ANALYSEUR DE SURFACE D'ONDE DE SHACK HARTMANN A LARGE DYNAMIQUE POUR LA MESURE DES ABERRATIONS DE L'OEIL

Réalisé par

ERIC HOFMANN

Proposé par

DR. FRANÇOIS WILDI

Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud

Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Travail de diplôme,

Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud,

Département Systèmes Industriels et Microtechniques,

Filière Microtechniques.

Yverdon-les-Bains, décembre 2004

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

La mesure de la forme des fronts d'onde en ophtalmologie permet de déterminer les aberrations d'un œil, car ces deux grandeurs sont étroitement liées. La méthode de mesure proposée ne requiert pas le processus habituel durant lequel le patient doit lire des séries de symboles afin de déterminer le type de défaut de son œil. La mesure de forme de fronts d'onde peut se faire à l'aide d'un senseur de Shack Hartmann (SH) qui analyse le front d'onde rétro diffusé par une petite zone éclairée de la rétine de l'œil. Le capteur de SH divise ce front en sous pupilles qui sont caractérisées par une phase moyenne. L'aberration de l'œil (myopie, astigmatisme, etc.) est déterminée par le traitement des informations recueillies par les différentes sous pupilles du senseur.

PLAN DU TRAVAIL

Les chapitres 1 et 2 traitent la simulation numérique du senseur de fronts d'ondes de Shack Hartmann dans son ensemble. Cette simulation sert à obtenir les informations nécessaires pour pouvoir effectuer une mesure par décomposition modale.

La technique utilisée pour reconstruire un front, à partir de l'image formée par le senseur, est développée au chapitre 3.

Le chapitre 4 détaille le dimensionnement d'un banc optique qui permette la meures des aberrations d'un oeil.

Le 5ème chapitre présente les mesures effectuées sur des yeux, ainsi que des mesures de lentilles ophtalmologiques étalonnées.

Le dernier chapitre apporte les conclusions tirées et propose une liste d'améliorations à effectuer en vue d'améliorer les performances du système.

Au cours de ce document, certains termes ont été traduits en anglais pour permettre de les retrouver plus facilement dans la littérature.

1 MODELE NUMERIQUE DU SENSEUR DE FRONT D'ONDE DE SHACK HARTMANN

1.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

1.1.1 DEFINITION D'UN FRONT D'ONDE

L'optique ondulatoire décrit la lumière comme étant une onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse approximative de 300'000 km/s. dans l'air

Les longueurs d'ondes qui sont perçues par l'œil humain sont comprises entre 400 et 800 nm.

Si on ne considère qu'une seule longueur d'onde, le lieu des points où la phase de cette onde est identique est appelé front d'onde. En comparant ce lieu des points avec un plan de référence, on peut déterminer ce qu'on appelle la forme du front d'onde.

Un front d'onde qui n'est pas parfaitement plat est dit aberré. La valeur RMS (angl. Root Mean Square) de cette surface permet de quantifier l'amplitude de l'aberration.

Le rayon lumineux, couramment utilisé en optique géométrique, est défini comme étant la normale à un élément de surface du front d'onde. La direction de propagation d'un front d'onde est donnée par la direction du rayon lumineux. Par conséquent, un front d'onde plat signifie que les rayons sont parallèles (ou collimatés). Cette dernière propriété sera souvent exploitée par la suite.

1.1.2 SYSTEMES OPTIQUES

Un système optique complexe peut se simplifier en deux plans, un plan d'entré et un plan de sortie.

La plupart des systèmes optiques présentent des variations du chemin optique entre les plans d'entrée et de sortie. Le chemin optique d'un rayon lumineux qui traverse le système dépend non seulement de l'endroit par lequel le rayon intercepte le plan d'entrée, mais également de son angle d'incidence.

Sachant qu'une différence de chemin optique se traduit par un changement de phase, un système optique est en mesure de changer la forme des fronts d'ondes. Réciproquement, la mesure de fronts d'ondes permet de caractériser un système.

1.1.3 SENSEUR DE FRONT D'ONDE DE SHACK HARTMANN

Le senseur de Shack Hartmann sert à déterminer la forme des fronts d'onde. Le senseur de front d'onde développé par Shack est une évolution du senseur de Hartmann. Il est constitué d'une trame de microlentilles identiques juxtaposées, de forme carrée ou hexagonale, et d'un détecteur photosensible, généralement une cellule CCD, placé au plan focal de ces lentilles. Ces microlentilles sont considérées comme des sous pupilles qui découpent le front d'onde.

Le capteur fonctionne selon le principe suivant :

REGIME NORMAL (REGIME LINEAIRE)

Pour un front d'onde incident plat, l'image formée sur la cellule CCD sera constituée de plusieurs points (angl. spots) très éclairés et centrés sur les axes optiques de chaque microlentille.

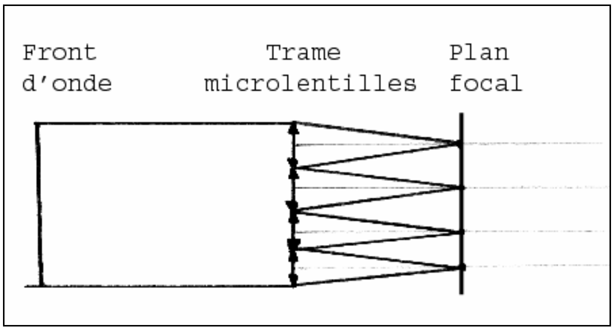


Figure 1 – SH régime normal, front plat (vue de profil)

Si en revanche le front d'onde n'est pas rigoureusement plat, alors les 'spots' formés par chaque microlentille présenteront un décalage par rapport à leur axe optique respectif.

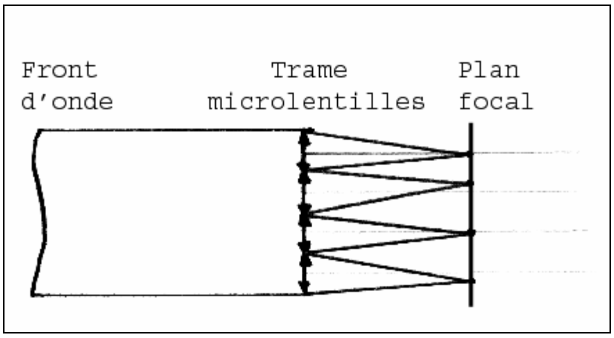


Figure 2 – SH régime normal, front peu aberré (vue de profil)

Ce décalage est proportionnel à la pente moyenne du front d'onde qui arrive sur la microlentille. L'information récupérée avec le senseur de Shack Hartmann est uniquement la position des ces spots. Le senseur de Shack Hartmann est donc un senseur qui réagit aux pentes de fronts d'ondes.

La position de chaque 'spot' de chaque microlentille peut donc en première approximation servir à reconstituer la forme du front d'onde par une simple intégration bidimensionnelle. Nous verrons par la suite une méthode bien plus efficace de reconstruction du front d'onde.

REGIME DE FORTES ABERRATIONS (NON LINEAIRE)

Si le front d'onde présente une pente locale très élevée, le décalage d'un spot par rapport à son axe optique de référence peut être supérieur à ½ fois la taille d'une microlentille. Dans ce cas il n'est plus possible de déterminer à quelle microlentille correspond ce spot, et

donc, la pente locale du front n'est plus mesurable de manière univoque.

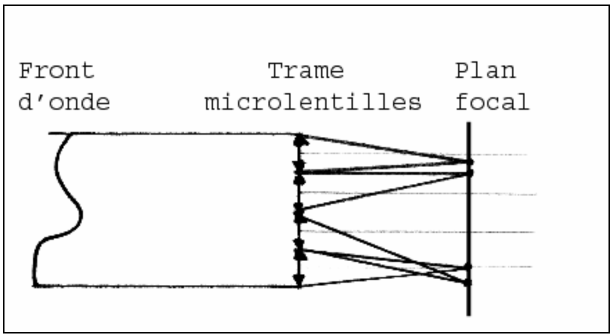


Figure 3 – SH régime fortes aberrations

1.1.4 METHODES DE RECONSTITUTION DU FRONT D'ONDE

A partir des positions des centroides des spots fournies par le senseur de Shack Hartmann, il est possible de retrouver les phases du front d'onde, soit à l'aide de matrices de reconstruction, soit à l'aide d'algorithmes de reconstruction de fronts d'ondes (angl. phase retrieval algorithms) [[1]].

La différence entre ces deux méthodes réside dans le fait que la méthode qui utilise une matrice de reconstruction nécessite moins de calculs, mais son utilisation se limite à un régime linéaire.

La méthode de reconstruction matricielle est développée au chapitre 3. Cependant, vu que son domaine d'application est limité au domaine linéaire, il faut s'assurer que toutes les différentes opérations effectuées lors de la simulation soient également linéaires.

1.1.5 CALCUL DE L'IMAGE FORMEE PAR UNE LENTILLE (OPTIQUE DE FOURIER)

L'optique ondulatoire (ou optique de Fourier) permet de décrire l'éclairement énergétique des points d'une image formée par une lentille située au plan focal, comme étant la transformée de Fourier bidimensionnelle du front d'onde au niveau de la lentille et délimitée par la forme de cette lentille.

Par exemple, dans notre cas précis de microlentilles de forme carrée, l'éclairement énergétique de l'image obtenue d'un front d'onde plat correspond à un sinus cardinal à 2 dimensions.

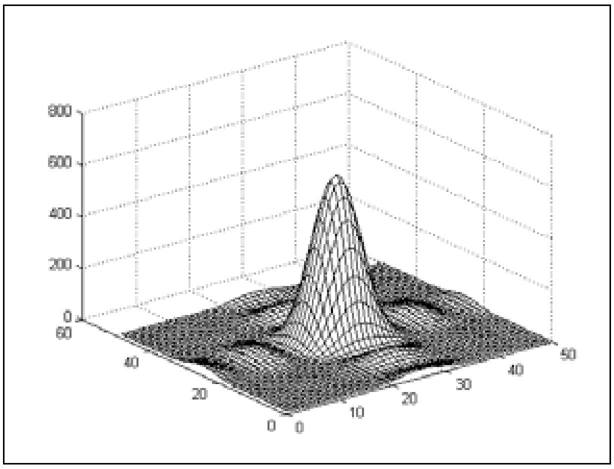


Figure 4 – Sinus cardinal à 2 dimensions

Le pic central est appelé ordre 0, les pics secondaires, ordres 1, 2, etc. Notons au passage que pratiquement toute l'énergie est concentrée dans le pic central (>94%)

Des fronts d'onde qui ne sont pas plats modifient la position du pic central par rapport à sa position de référence et dans une faible mesure la forme du pic.

A l'aide du logiciel de simulation numérique MATLAB, nous sommes en mesure de simuler l'image perçue par une cellule CCD placée sur le plan focal des lentilles de la trame, à l'aide de la transformée de Fourier.

Cette simulation fait intervenir les opérations suivantes :

La forme du front d'onde (les aberrations) doit d'abord être définie, et échantillonnée. Le front est ensuite découpé en plusieurs sous pupilles qui correspondent à chacune des microlentilles de la trame. On calcule ensuite l'image obtenue pour chaque microlentille individuellement, puis on recompose la totalité de l'image réelle sur le capteur CCD. On effectue ensuite une pixellisation ainsi qu'une quantification de l'image obtenue pour simuler l'image transmise par la cellule CCD.

1.1.6 RELATIONS ENTRE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET L'OPTIQUE DE FOURIER

Il existe une analogie entre l'optique de Fourier et l'optique géométrique, pour l'analyse des centroides, c'est la position du pic central de l'image qui est identique dans les deux analyses.

La relation se vérifie facilement pour un front d'onde incliné.

RELATIONS ENTRE LE FRONT D'ONDE ET L'IMAGE DANS L'OPTIQUE DE FOURIER

Admettons un front plat dont l'énergie et la phase sont donnés par:

$$x(t_1,t_2) \qquad (1.1)$$

t_1 et t_2 étant les axes du repère du front. Les différences de phases, représentées par les parties complexes sont dans ce cas nulles.

Un front d'onde incliné selon l'axe t_1 est quant à lui donné par:

$$x(t_1, t_2) \cdot e^{j \cdot \omega_o \cdot t_1} \text{ [2]} \quad (1.2)$$

Les différences de phases ne sont plus nulles dans ce cas et croissent lorsqu'on se déplace selon l'axe t_1 (c'est donc bien un front incliné).

Dans le plan image, i.e. dans le domaine de Fourier, un front plat donne:

$$X(j \cdot \omega_1, j \cdot \omega_2) \quad (1.3)$$

ω_1 et ω_2 sont les axes du repère de l'image.

Un front incliné donne quant à lui:

$$X(j \cdot (\omega_1 - \omega_o), j \cdot \omega_2) \quad (1.4)$$

Il apparaît de ce fait qu'un front d'onde incliné introduit un décalage proportionnel à l'inclinaison de l'image.

Les noms des variables utilisés pour cette démonstration ne seront plus repris par la suite.

Relations entre le front d'onde et l'image dans l'optique geometrique

Un front d'onde plat signifie que les rayons sont collimatés et parallèles à l'axe optique.

Dans ce cas, tous les rayons qui traversent une lentille convergente se focalisent en un point sur l'axe optique.

Un front d'onde incliné signifie que les rayons sont collimatés, mais forment également un angle par rapport à l'axe optique. Cet angle est le même que l'angle d'inclinaison du front d'onde.

Dans ce cas, tous les rayons qui passent à travers une lentille convergente se focalisent en un point sur le plan focal, mais pas sur l'axe optique. L'écart entre ce point de focalisation et l'axe optique est donné par:

$$X = f' \cdot tg(\alpha) \quad (1.5)$$

Δh est l'écart en question, f' est la distance focale image de la lentille et α est l'angle d'inclinaison du front d'onde.

Constatations

L'optique de Fourier et l'optique géométrique sont complémentaires et vont servir à vérifier la simulation.

1.2 Realisations et documentations

1.2.1 Simulation d'un front d'onde

Afin d'obtenir tous les types de front d'ondes possible, nous utilisons une combinaison linéaire de polynômes de Zernike (voir annexe 1).

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot Z_i(x, y) \quad (1.6)$$

Lors de la simulation nous avons une matrice φ qui représente les différences de phases du front d'onde, composée des n premiers modes de Zernike d'amplitude RMS valant a. Dans le cas d'un oeil humain, on ne s'intéresse qu'aux 20 premiers modes de Zernike, les modes d'ordre supérieur ayant des amplitudes négligeables [3].

La valeur RMS d'un front d'onde se calcule de la manière suivante:

$$RMS = \frac{\sqrt{\sum_{x,y} \varphi(x, y)^2}}{P} \quad (1.7)$$

P est le nombre d'éléments utilisé pour calculer la valeur RMS.

La fonction utilisée pour générer ces modes de Zernike est: `Zernike_modes.m`

Il est intéressant de noter que 1 radian de la longueur d'onde utilisée a comme particularité de valoir également 10^{-7} m. Ceci permet de faire plus facilement la relation entre ces deux grandeurs.

1.2.2 Echantillonnage du front d'onde au niveau de la trame de microlentilles

Le paramètre déterminant à ce niveau pour la simulation, est la distance entre chaque échantillon nommée d_e.

Cette distance est un compromis pour répondre à plusieurs critères:

Conservation de l'orthogonalite des modes de Zernike

Les modes de Zernike forment une base orthogonale sur un domaine continu. Dans un domaine échantillonné cette propriété n'est pas conservée. Elle se dégrade d'autant plus que le nombre d'échantillons utilisés pour les représenter diminue. Le critère utilisé pour considérer la base modale comme étant orthogonale est le produit scalaire de deux modes. Celui-ci doit être nul si les modes sont différents, et est unitaire s'ils sont identiques.

ABSENCE DE REPLIEMENT SPECTRAL SUR LES IMAGES SIMULEES

Les modes de Zernike contiennent des fréquences spatiales qui dépendent de leur amplitude et de leur type. La fréquence spatiale d'échantillonnage nécessaire dépend de ce fait des fronts d'ondes qui sont simulés. La différence de phase entre deux échantillons contigus ne doit pas dépasser π radians. Cette fréquence augmente en général si les modes sont élevés et si leur amplitude est élevée. Dans notre cas, seuls les 60 premiers modes de Zernike seront simulés, alors que l'amplitude des ces modes ne doit pas faire passer le senseur au régime de fortes aberrations. Ces considérations permettent de déterminer la fréquence d'échantillonnage minimum.

LIMITATION DU NOMBRE D'ECHANTILLONS

Le nombre d'échantillons qui forment une matrice détermine le temps et l'espace mémoire nécessaire à une transformée de Fourier de cette matrice. Ces critères ne sont déterminants que dans le cas de mesures en temps réel, ou si la machine utilisée pour faire ces calculs a des performances limitées.

1.2.3 CONSTRUCTION DU FRONT D'ONDE

Jusqu'à présent, le front d'onde est une matrice de points qui définissent uniquement les différences de phases du front d'onde par rapport à un plan de référence parallèle à la trame de microlentilles. L'amplitude (flux énergétique par unité de surface) du front est considérée comme étant égale en tous points du front.

Les différences de phases locales du front d'onde sont inscrites dans une matrice carrée dont le nombre d'éléments par ligne est donnée par:

$$Nb = \frac{n \cdot D}{d_e} \qquad (1.8)$$

Nb est le nombre d'éléments (ou échantillons) par ligne de la matrice du front d'onde, *n* est le nombre de microlentilles par ligne de la trame, *D* est la taille d'une microlentille exprimée en [m], *de* est la distance entre deux échantillons (ou période d'échantillonnage) exprimée en [m].

Les éléments de cette matrice sont ensuite utilisés pour déterminer une matrice F qui décrit entièrement le front d'onde en phase et en amplitude.

$$F(x,y) = 1 \cdot e^{j \cdot \varphi(x,y)} \qquad (1.9)$$

Cette matrice de nombres complexes est finalement limitée par une pupille de forme circulaire dont le diamètre correspond la taille de la matrice. Les éléments qui se situent à l'extérieur de cette pupille ont une amplitude nulle. Cette opération sert non seulement à simuler le fait que la pupille de l'œil ainsi que les lentilles et les diaphragmes utilisés ont une forme circulaire, mais elle est nécessaire à l'utilisation des polynômes de Zernike. Dans le cas présent, cette ouverture circulaire est la pupille de sortie du système.

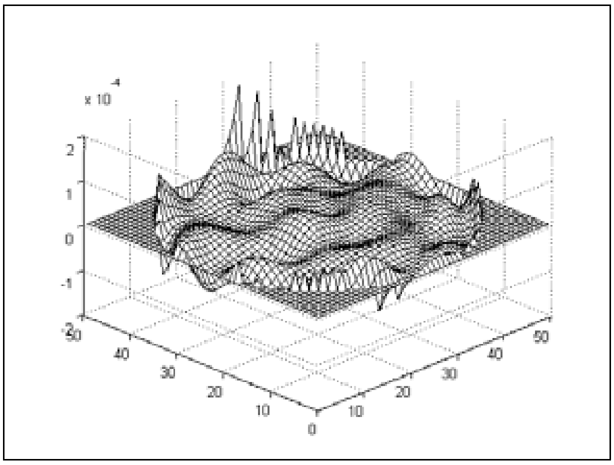


Figure 5 – Exemple de forme de front d'onde incident (combinaison linéaire des 60 premiers modes de Zernike d'amplitudes variables).

1.2.4 CALCUL DE L'IMAGE PAR TRANSFORMEE DE FOURIER

Le front d'onde est découpé en plusieurs sous pupilles qui correspondent aux microlentilles de la trame. L'image de chacune d'elles est calculée par transformée de Fourier du front d'onde, puis elles sont recomposées pour former l'image réelle qui se trouve sur la cellule CCD. Lors de cette recomposition, on considère qu'il n'y a pas d'interférences entre différentes images.

DETERMINATION DE LA TAILLE DE LA MATRICE DE CHAQUE SOUS PUPILLE

Afin d'augmenter la résolution de l'image simulée, il est possible de placer la matrice du front d'onde dont on désire calculer l'image, au centre d'une matrice carrée de taille plus grande dont tous les éléments sont nuls. Cette opération ne modifie en rien la fréquence d'échantillonnage ou la pente maximale avant repliement, mais augmente uniquement la résolution de l'image c'est-à-dire le nombre d'éléments de la matrice image. Cette opération est effectuée avant de calculer l'image par transformée de Fourier, et permet d'améliorer la linéarité de l'opération, donc la qualité, de la simulation.

Le nombre d'éléments par ligne de cette matrice nulle est déterminé par ce que nous avons appelé le *facteur de garde* noté *gf*. Il intervient de la manière suivante dans les calculs:

$$N = g_f \cdot \frac{Nb}{n} \qquad (1.10)$$

Ce facteur de garde est optimisé par la suite pour limiter les erreurs d'approximation lors des arrondis.

DETERMINATION DE LA DISTANCE QUI SEPARE 2 ELEMENTS DE LA MATRICE IMAGE : ΔX

La position de l'ordre 0 de la transformée de Fourier se situe sur l'axe optique de la lentille si les différences de phases du front d'onde incident sont nulles en tous points (front d'onde plat).

Cette position varie en fonction des différences de phases présentes dans le front d'onde.

Nous allons à présent déterminer la distance qui sépare deux éléments de la matrice image pour pouvoir faire la relation entre un certain nombre d'échantillons et leur dimension physique.

Démonstration:

Supposons que le front d'onde ait une inclinaison constante (tilt) selon l'axe tangentiel. La position de l'ordre 0 par rapport à l'axe optique est déterminée par la relation suivante:

$$X = \omega_X \cdot \frac{f'_m}{k} \quad [4] \qquad (1.11)$$

La distance entre deux échantillons de l'image devient:

$$\Delta X = \Delta\omega_X \cdot \frac{f'_m}{k} \qquad (1.12)$$

avec:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \qquad (1.13)$$

X est la distance qui sépare l'ordre 0 de l'axe optique, *ωx* est la pulsation spatiale correspondant à la pente du front d'onde, *k* est le nombre d'onde de la lumière utilisée pour l'expérience, *λ* est la longueur d'onde et *f'* est la distance focale des microlentilles.

On sait que la fréquence spatiale maximale (f_{max}) qui peut être simulée vaut, de par la période d'échantillonnage:

$$f_{max} = \frac{1}{2 \cdot d_e} \qquad (1.14)$$

et donc on trouve

$$\omega_{max} = \frac{\pi}{d_e} \qquad (1.15)$$

Sachant que la matrice image comporte N éléments par ligne, on peut en déduire que la pulsation spatiale entre 2 échantillons vaut:

$$\Delta\omega_x = \frac{2 \cdot \omega_{max}}{N} \qquad (1.16)$$

Finalement, la distance entre 2 éléments au niveau de l'image vaut:

$$\boxed{\Delta X = \frac{f'_m \cdot \lambda}{N \cdot d_e} = \frac{f'_m \cdot \lambda}{g_f \cdot D}} \qquad (1.17)$$

DETERMINATION DE LA POSITION DES IMAGES DE CHAQUE SOUS PUPILLE AVANT RECOMPOSITION

La taille physique de chaque matrice au niveau de l'image est supérieure à la taille d'une sous pupille. Il s'agit là d'une conséquence du facteur de garde. Pour simuler l'image réelle présente sur le capteur, il faut pouvoir combiner les images obtenues individuellement. Chaque matrice image est placée dans une matrice de plus grande taille qui peut recevoir toutes les images individuelles, elle constitue le capteur CCD.

Le décalage à faire entre chaque matrice image, exprimé en nombre d'éléments, est donné par:

$$dec = \frac{D}{\Delta X} = \frac{D}{\frac{f' \cdot \lambda}{N \cdot d_e}} \qquad (1.18)$$

d'autre part,

$$N = g_f \cdot \frac{D}{d_e} \qquad (1.19)$$

On obtient donc un décalage entre chaque image de:

$$\boxed{dec = \frac{D^2}{f' \cdot \lambda} \cdot g_f} \qquad (1.20)$$

D est la taille d'une microlentille exprimée en mm, *λ* est la longueur d'onde utilisée pour l'expérience.

LIMITATION DES ERREURS, OPTIMISATION DU FACTEUR DE GARDE

Le facteur de garde est optimisé selon plusieurs critères, mais dont le but est de minimiser les erreurs commises lors des arrondis qui interviennent à chaque fois que l'on établit la relation entre un nombre d'échantillons et leur dimension physique.

Premier critère d'optimisation

La taille de la matrice de chaque sous pupille *N* n'est pas forcément un nombre entier. Le facteur de garde doit donc être ajusté de manière à minimiser l'erreur lors de l'arrondi de ce nombre.

L'erreur due à l'arrondi sur le nombre d'éléments de la matrice image par sous pupille est inférieur à 0.1 %

Deuxième critère

Lors de la recomposition, il faut également que le décalage entre les différentes matrices soit un nombre entier. La taille d'une sous pupille correspond à un nombre entier de *ΔX*.

L'erreur due à l'arrondi sur le nombre d'échantillons par sous pupille est inférieur à 0.1 %

Troisième critère,

Ce dernier critère n'est pas d'importance critique, mais permet de faire correspondre un échantillon à l'axe optique d'une lentille, au lieu d'un groupe de 4 échantillons.

La fonction qui s'occupe de cette optimisation est: `echelle_optimale.m`

1.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

1.3.1 ORTHOGONALITE DES MODES DE ZERNIKE

Le nombre d'éléments qui composent la matrice du front d'onde et par conséquent la distance qui les sépare détermine l'orthogonalité des modes de Zernike.

Les figures suivantes donnent un aperçu de l'orthogonalité de modes de Zernike. Les matrices représentent tous les produits scalaires possibles entre les modes de Zernike.

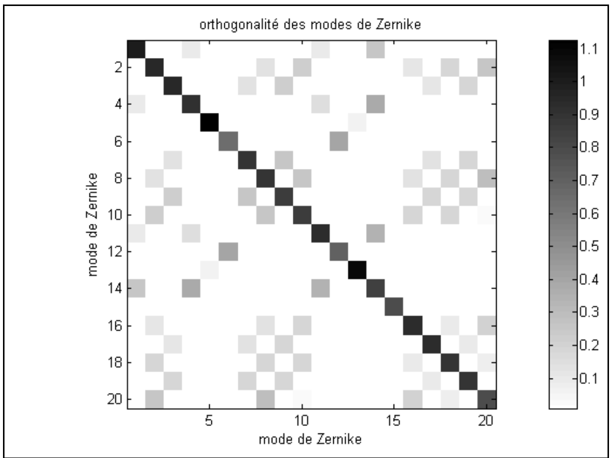


Figure 6 – orthogonalité des modes avec N = 10 échantillons

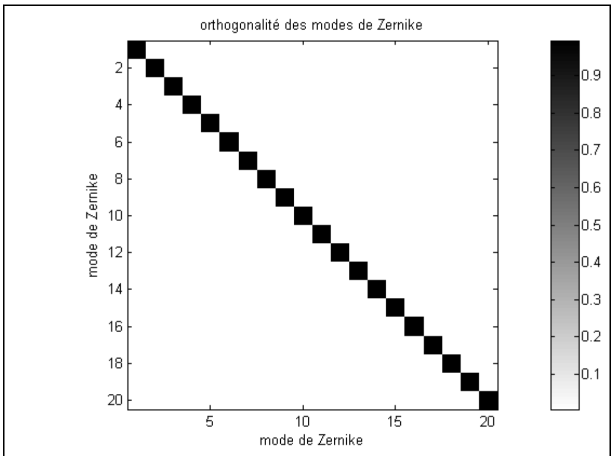


Figure 7 – orthogonalité des modes avec N = 100 échantillons

L'orthogonalité peut être quantifiée en observant le produit scalaire le plus élevé entre deux modes différents. Dans le cas d'un échantillonnage très grossier, la matrice du front d'onde ne contient que 10 éléments par ligne. Dans ce cas, le produit scalaire atteint 0.2599, soit 26 %. Pour les paramètres de simulation, la matrice contient 319 éléments par ligne. Le produit scalaire s'abaisse dans ce cas à 0.0010, soit 0.1%.

1.3.2 VERIFICATION DE LA SIMULATION

Cette étape consiste à vérifier le bon fonctionnement du programme de simulation de la trame de microlentilles du senseur de Shack Hartmann. Afin de tester si le programme offre une réponse fiable, nous avons comparé les résultats de la simulation avec une analyse d'optique géométrique.

Soit un front d'onde incident avec un tilt dont l'angle par rapport au plan de référence vaut α. Cet angle est déterminé par la relation (1.5):

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{D}{2 \cdot f'}\right)$$

L'optique géométrique prévoit dans ce cas, que la position de l'ordre 0 de l'image est décalée de ½ *D*. Si à présent, le front d'onde incident sur une microlentille voisine a une inclinaison égale à *–α*, l'ordre 0 de cette seconde image devrait se superposer à l'ordre 0 de la première lentille.

L'intensité de ce point devrait également être le double des autres points que nous pouvons observer.

TESTS ET MESURES

L'angle *α* qui représente la pente du front d'onde est déterminé pour les conditions suivantes :

D = 0.3 mm

f' = 40 mm

d_e = 5.55 µm

g_f = 5.907

N = 319

λ = 633 nm

1) Par l'optique géométrique, l'angle d'inclinaison du front vaut:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{D}{2 \cdot f'}\right) = \mathrm{arctg}\left(\frac{0.3}{2 \cdot 40}\right) = 3.75 \text{ mrad}$$

2) Par mesure de la différence de phase entre deux points de la matrice du front d'onde:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta n}\right) = \mathrm{arctg}\left(\frac{41.45 \cdot \lambda}{200 \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_e}\right) = 3.76 \text{ mrad}$$

3) Par mesure du décalage du spot (élément de la matrice image dont l'intensité est maximale) par rapport à son axe optique:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{pix \cdot n}{f'}\right) = \mathrm{arctg}\left(\frac{14.3 \cdot 10^{-6} \cdot 10.5}{40 \cdot 10^{-3}}\right) = 3.75 \text{ mrad}$$

pix est la taille d'un pixel, *n* est le nombre de pixels correspondant au décalage observé. Pour ce dernier calcul, la position du spot n'a pas été calculée par la méthode du centre de gravité, mais déterminée d'après la position du maximum d'intensité du spot.

La valeur du niveau d'intensité maximum de ce spot est de 1366 alors qu'elle est de 711 pour les autres spots. Le rapport de ces deux intensités est de 1.92.

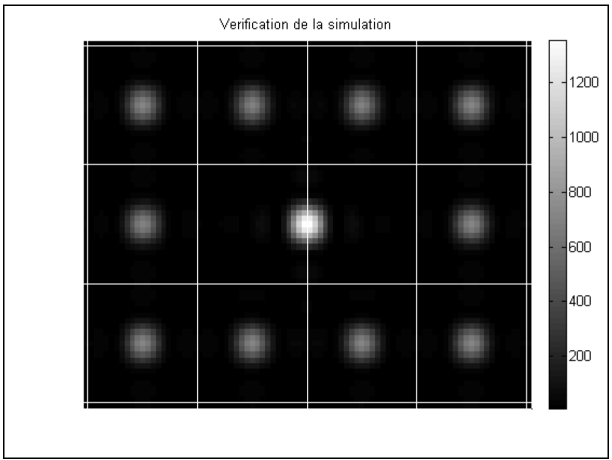


Figure 8 – Vérification de la simulation par le déplacement de 2 spots

ANALYSE DES RESULTATS

Les 3 analyses d'angles présentent les mêmes résultats avec une erreur de moins de 0.3 %.

L'analyse des niveaux d'intensité présente quant à elle une erreur de 4%. Cette erreur, plus élevée que la mesure d'angles, peut s'expliquer en partie par le fait que maximum d'intensité est moins bien défini lorsqu'il est échantillonné. Cette erreur revêt ainsi un aspect indicatif.

Fort de ces observations, nous pouvons conclure que le modèle numérique de la trame de microlentilles du senseur de fronts d'ondes répond de manière fidèle. Du moins pour des pentes inférieures à celle utilisée pour cette vérification.

La fiabilité du modèle doit être à nouveau vérifiée si on désire utiliser le senseur pour simuler des pentes supérieures à celle utilisée pour cette vérification. Une pente très élevée provoquera assurément du repliement spectral.

2 EXTENSION DU MODELE

2.1 PIXELLISATION

2.1.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

Une fois que l'image formée par la trame de microlentilles a été complètement reconstituée, Il faut ensuite simuler le comportement de la cellule CCD, à savoir effectuer une pixellisation.

Les cellules CCD sont caractérisées par leur fréquence spatiale d'échantillonnage. Celle-ci est déterminée par la taille d'un pixel, ce qui correspond en fait à la période d'échantillonnage de la cellule.

L'intensité lumineuse qui arrive sur chaque pixel est numérisée et donc quantifiée, ce qui signifie que la cellule CCD ne dispose que d'un nombre fini de bits pour représenter les multiples niveaux d'intensité lumineuse qu'elle reçoit.

L'étape de pixellisation est une opération clairement non linéaire, dont il va falloir chercher à diminuer ce caractère afin de pouvoir effectuer une reconstruction linéaire.

La figure suivante donne un aperçu d'une pixellisation trop grossière:

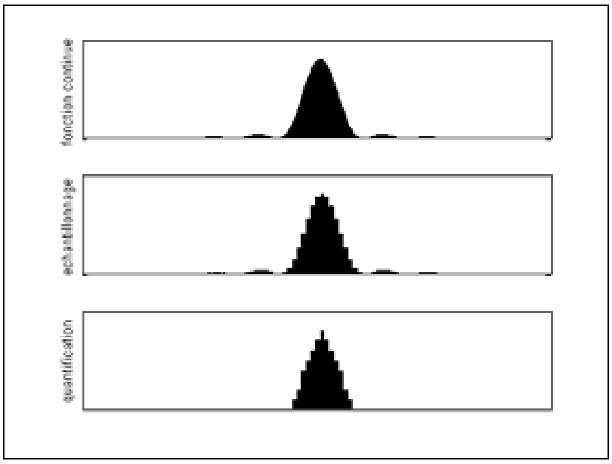


Figure 9 – Effets de la pixellisation

La dimension physique d'un échantillon de la matrice image simulée ne correspondant pas forcément à la taille d'un pixel, il est de ce fait nécessaire de procéder à des ajustements pour passer de la matrice de l'image simulée à la matrice représentant la cellule CCD.

La meilleure linéarité de pixellisation est obtenue lorsque le rapport entre la taille d'un pixel et la taille d'un échantillon est un nombre entier. Si ce n'est pas le cas, il faut considérer chaque pixel et déterminer l'intensité lumineuse correspondante.

Les paramètres de simulation qui permettent de faire varier la dimension physique d'un échantillon de la matrice image sont le facteur de garde g_f et la taille de la matrice du front d'onde. C'est sur ces deux paramètres que nous allons agir pour obtenir le meilleur rapport de dimensions entre un échantillon et un pixel.

La disposition des pixels sur la cellule CCD ainsi que leur forme doit également être prise en compte lors de la pixellisation. Le cas le plus courant étant des pixels de forme carrée juxtaposés.

2.1.2 REALISATIONS ET DOCUMENTATIONS

Pour notre simulation, le nombre d'échantillons par pixel est de 1.011 Cela signifie qu'environ 1 pixel sur 100 devrait avoir une intensité double de celle du pixel voisin. Cette caractéristique n'étant que peu souhaitable, nous avons opté pour la solution qui consiste à forcer le rapport à 1. Ce qui signifie que l'erreur est à présent reportée sur la taille d'un pixel. La simulation sera alors moins proche de la situation réelle, mais la matrice de reconstruction sera plus juste.

Le nombre de bits de la caméra est simulé en prenant normalisant les niveaux de la simulation et en les quantifiant sur 12 bits.

2.1.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

Les figures suivantes présentent de manière qualitative les effets de la pixellisation sur l'image d'un spot pour une taille de pixel de 14.3 µm et une quantification sur 100 niveaux.

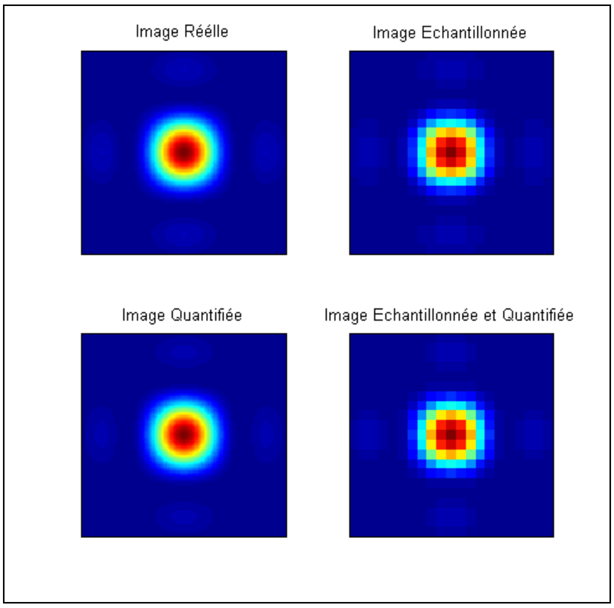


Figure 10 – Effets de la pixellisation sur les images obtenues sur la cellule CCD

On observe une très nette dégradation de la qualité de l'image entre l'image réelle et l'image pixellisée. L'influence de la quantification quant à elle moins marquée. Les effets quantitatifs de la pixellisation seront abordés lors de la localisation des spots.

2.2 LOCALISATION DES SPOTS (ANGL. SPOT WANDERING)

2.2.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

La simulation nous a permis d'obtenir une représentation fidèle du comportement du capteur de SH ainsi que de la cellule CCD. L'étape suivante consiste à déterminer la position des spots par rapport à l'axe optique de chaque microlentille, pour permettre ensuite la reconstruction du font d'onde. Lors de cette étape, la position du centroide C de chaque 'spot' peut être calculée d'après le centre de gravité de l'éclairement énergétique du groupe de pixels qui se trouve dans la projection d'une microlentille.

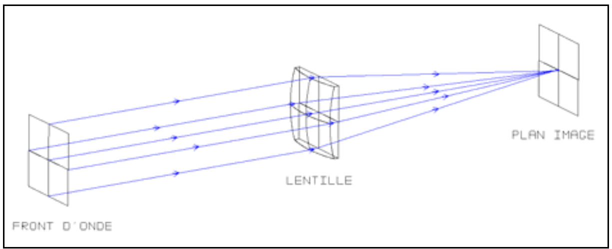


Figure 11 –Projection de la microlentille sur le plan image

La position du centroide est alors donnée par:

$$C(x_c, y_c) \qquad (2.1)$$

avec:

$$x_c = \frac{\sum_{i,j} I_{i,j} \cdot x_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \qquad y_c = \frac{\sum_{i,j} I_{i,j} \cdot y_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \qquad (2.2)$$

x_c et y_c sont les composantes selon les axes *x* et *y*. *I* est l'intensité d'énergie mesurée au point image donné par les indices *i* et *j*. Lors de ce calcul de la position du centroide, on ne se préoccupe pas du nombre de spots qui peuvent éventuellement se trouver derrière une microlentille. Ceci implique que si le régime de fonctionnement du senseur n'est pas linéaire la position calculée du centroide ne correspond plus à sa position réelle.

Il incombe à l'utilisateur de vérifier que le régime de fonctionnement du senseur correspond à ses attentes. Ce régime de fonctionnement peut être déterminé de manière visuelle en appliquant une grille correspondant à la trame, sur l'image formée sur le CCD. Le régime du senseur est linéaire si tous les 'spots' sont compris dans une sous ouverture.

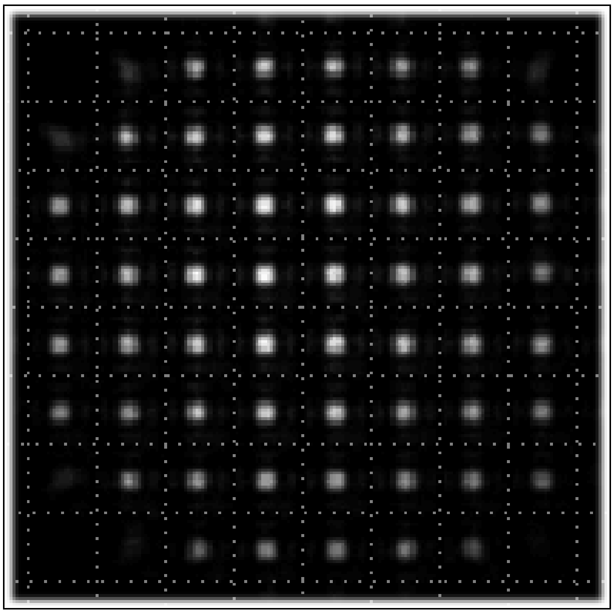


Figure 12 – Positionnement virtuel de la trame

Il existe d'autres méthodes pour déterminer la position des centroides avec plus de précision, cependant, elles nécessitent d'avantage de traitement d'image et ne seront développées que si les résultats obtenus par la simple méthode des centres de gravité n'apportent pas satisfaction.

L'une d'entre elles consiste à effectuer un filtrage gaussien de l'image, avant de rechercher les centroides.

La fonction utilisée pour déterminer les centroides est: `find_centroids.m`

2.2.2 REALISATIONS ET DOCUMENTATIONS

LOCALISATION DES CENTROIDES PAR LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE

La localisation des centroides n'est effectuée que sur un nombre entier de pixels. Sauf grande coïncidence, la taille de la microlentille ne correspond pas à un nombre entier de pixels de la cellule CCD et les axes optiques des lentilles de la trame ne sont jamais exactement alignés sur les pixels.

De ce fait, lors de la recherche du centroide, la matrice sur laquelle est effectuée la recherche du centre de gravité ne correspond pas tout à fait à la projection d'une microlentille, mais a une taille légèrement différente et est décalée.

Cette différence de taille et le décalage maximaux ne dépassant pas la taille d'un pixel, cette approximation représente 5% de la taille de la microlentille, pour nos paramètres d'expérience (la taille de la microlentille est de 300 µm, alors que la taille d'un pixel est de 14.3 µm). Cette erreur est tout à fait acceptable dans les cas de faibles aberrations, car tous les spots formés par chaque microlentille sont très proches du centre de l'image. L'essentiel de l'énergie étant concentrée dans le l'ordre 0 (pic central), l'erreur engendrée par l'énergie

qui n'est pas prise en compte dans les bords ne représente alors qu'une infime fraction de l'énergie totale. Le centre de gravité ne sera alors que très faiblement perturbé.

Une fois le centre de gravité de la matrice déterminé, la position réelle du centroide est obtenue en y additionnant le décalage de la matrice par rapport à la microlentille concernée.

SEUILLAGE DE L'IMAGE

Si les images fournies par la caméra contiennent du bruit, il est possible d'effectuer un seuillage de l'image avant la recherche des centroides. Le seuillage consiste à repérer le niveau moyen du bruit, puis à soustraire ce niveau à tous les pixels. Cette opération à l'avantage d'augmenter le rapport signal sur bruit.

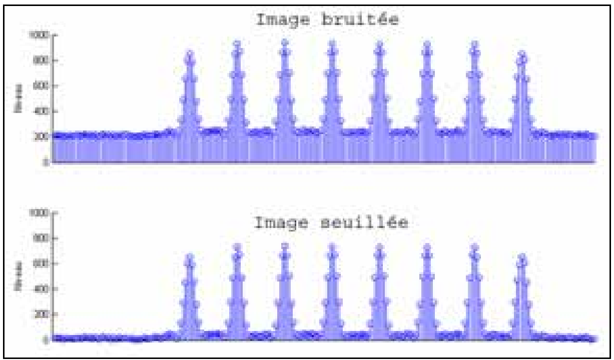


Figure 13 – Exemple de seuillage

QUANTIFICATION DES EFFETS DE LA PIXELLISATION

Etant donné le caractère clairement non linéaire de la pixellisation, il est nécessaire de déterminer quantitativement les erreurs introduites.

Pour cela, nous avons comparé la position du centroide obtenue sur une image centrée et très peu pixellisée (2.27 µm par pixel), considérée comme réelle et sur une image fortement pixellisée (14.3 µm par pixel), correspondant à la caméra utilisée. Nous avons ensuite décalé l'image réelle d'une faible quantité (2.27 µm) et mesuré les nouvelles positions des centroides. La position du centroide calculé sur l'image pixellisée est idéalement identique à celle calculée à partir de l'image réelle.

2.2.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

ERREUR DE LOCALISATION DU CENTROIDE

La relation qui permet de mesurer le mesurer le déplacement du centroide en mètres est:

$$\Delta n \cdot d_{pix} = \Delta C \qquad (2.3)$$

Δn est la position du centroide exprimée en nombre d'éléments de la matrice image, d_{pix} est la taille réelle d'un pixel [m], et ΔC est la position du centroide exprimée en [m].

Positions du centroide de l'image centrée

Image 'réelle':

$$-5.68 \cdot 10^{-14} \cdot 2.27 \cdot 10^{-6} = -1.29 \cdot 10^{-19} \text{ m}$$

Image pixellisée:

$$0 \cdot 14.3 \cdot 10^{-6} = 0 \text{ m}$$

Positions du centroide de l'image légèrement décalée

Image 'réelle':

$$-0.946 \cdot 2.27 \cdot 10^{-6} = -2.15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Image pixellisée:

$$-0.154 \cdot 14.3 \cdot 10^{-6} = -2.19 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Le repérage de la position du centroide est en effet affecté par la pixellisation à hauteur de 2% par rapport à l'image réelle.

Il est indispensable de tenir compte de cet effet lors de la simulation pour déterminer la précision que l'on est susceptible d'atteindre avec ce senseur de fronts d'ondes.

LINEARITE DE LOCALISATION DES SPOTS

Pour vérifier que la localisation des spots est linéaire, nous avons observé la réaction du SH à différents fronts d'ondes simulés qui sont, dans le cas présent, des tips et tilts d'amplitudes croissantes (pentes croissantes).

En comparant les positions des centroides mesurés avec les pentes réelles (obtenues par calcul d'optique géométrique) du front d'onde simulé, nous pouvons déterminer les erreurs de détection des centroides. Ces erreurs sont dues d'une part à la pixellisation et d'autre part à la méthode de calcul des centroides par le centre de gravité.

La première erreur peut être atténuée en choisissant une caméra disposant de petits pixels et un mode de quantification sur un nombre élevé de bits.

La seconde quant à elle ne peut être corrigée, que si la méthode de détection des centroides est modifiée, car elle vient du fait que l'on ne tient pas compte du nombre de spots qui peuvent se trouver derrière chaque microlentille.

Lors de l'implémentation, les positions des centroides sont stockées dans deux matrices et organisés de la manière suivante. La première matrice correspond aux positions des centroides selon un des axes, la seconde selon l'autre axe.

$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,8} \\ x_{2,1} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{8,1} & \cdots & \cdots & x_{8,8} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,8} \\ y_{2,1} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{8,1} & \cdots & \cdots & y_{8,8} \end{bmatrix}$$

Par exemple, la position du centroide de l'image formée par la microlentille située dans le coin supérieur gauche est donné par: C($x_{1,1}$, $y_{1,1}$).

Ces deux matrices sont ensuite transformées en un seul vecteur dans l'ordre suivant:

$$S = \lfloor x_{1,1} \quad x_{1,2} \quad \cdots \quad x_{8,8} \quad y_{1,1} \quad y_{1,2} \quad \cdots \quad y_{8,8} \rfloor$$

Nous disposons d'une trame de 8x8, soit 64 microlentilles au total, mais à cause de la pupille circulaire, seulement 52 sont suffisamment illuminées pour pouvoir fournir une position de centroide fiable. Le vecteur S ne contient pas les positions des centroides correspondant à ces microlentilles.

Ces lentilles qui ne sont pas prises en compte sont les 3 lentilles qui se trouvent dans les coins de la trame.

Le vecteur S ne contient alors plus que

$$64 + 64 - 3 \cdot 4 \cdot 2 = 104$$

C'est ce même vecteur qui est ensuite représenté sur les graphiques suivants.

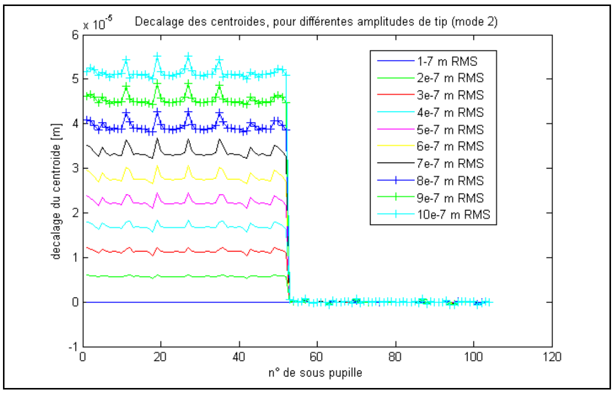


Figure 14 – Positions mesurées des centroides pour du tip

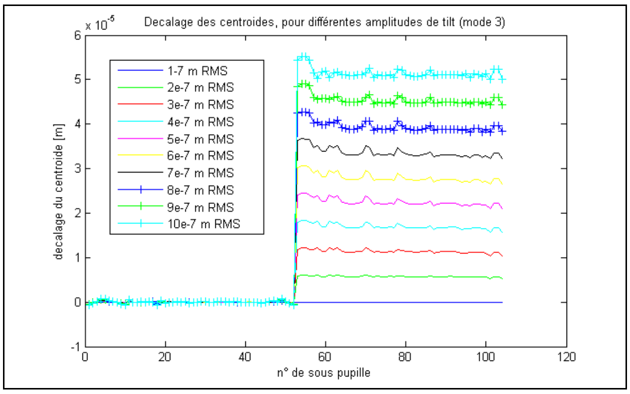


Figure 15 – Positions mesurées des centroides pour du tilt

OBSERVATIONS

On peut noter que l'amplitude du tilt a une influence sur la position des centroides selon l'axe x, mais n'a aucune répercussion sur l'axe y. La réciproque se vérifie aussi pour le tip. Ceci démontre également que le tip et le tilt sont orthogonaux.

Le déplacement mesuré des spots, par la méthode du centre de gravité, est bel et bien proportionnel à l'amplitude RMS du front d'onde incident. Ceci nous permet de vérifier le caractère linéaire de cette relation.

Certains spots ont un déplacement différent de leurs voisins. Il s'agit là des spots situés dans les bords du senseur de fronts d'ondes. La pupille de sortie du système est plus petite que la trame de microlentilles, par conséquent, certaines lentilles ne sont pas complètement illuminées, d'où apparition d'erreurs. Les positions des centroides de ces spots sont tout de même pris en compte, car l'information qu'ils contiennent permet de mesurer des types d'aberrations (modes) supplémentaires.

Pour des faibles tip et tilt, les erreurs de localisation des centroides sont faibles. Il est alors avantageux de positionner la trame de microlentille de sorte que le tip et le tilt soient nuls.

3 ALGORITHME DE RECONSTRUCTION LINEAIRE D'UN FRONT D'ONDE

3.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

Tout front d'onde peut être décomposé en une somme infinie de modes de Zernike de différentes amplitudes (c.f. Annexe : Modes de Zernike), soit:

$$\varphi(x,y) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot Z_i(x,y)$$

où *n* est le nombre de modes qui tend vers l'infini

Cette opération s'appelle la décomposition modale d'un front d'onde.

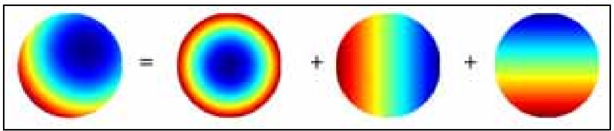


Figure 16 – Décomposition modale en 3 modes d'un front d'onde

D'autre part, pour de petites amplitudes, il existe une relation linéaire entre l'amplitude RMS d'un mode de Zernike du front incident et la position des centroides des spots formés par la trame de microlentilles:

Ces deux considérations nous permettent de formuler l'équation matricielle suivante:

$$D' \cdot Z_V = S_V \qquad (3.1)$$

D' est la matrice caractérisant le système linéaire (dimensions de la trame de microlentilles, longueur d'onde utilisée, etc.), Z_V le vecteur contenant les amplitudes des différents modes de Zernike et S_V le vecteur contenant les positions des centroides mesurés. Leur structure est la suivante:

$$\begin{bmatrix} D_{1,1} & \cdots & D_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{n,1} & \cdots & D_{n,m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ \cdots \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ S_n \end{bmatrix}$$

La matrice *D'* caractérisant le système peut être obtenue par simulation numérique, du fait que le système est linéaire. Un vecteur S_V est calculé pour chaque mode de Zernike avec une amplitude unitaire.

La combinaison linéaire des vecteurs des modes (Z_V) et des centroides (S_V), permet d'obtenir respectivement une matrice *Z* qui se trouve être en fait une matrice identité, et une matrice de centroides *S*. De ce fait, la matrice *D'* qui multiplie une matrice identité et est égale à *S*.

$$D' = Z \cdot S \qquad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} D_{1.1} & \cdots & D_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{n,1} & \cdots & D_{n,m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{1,1} & \cdots & Z_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{m,1} & \cdots & Z_{m,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1.1} & \cdots & S_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n,1} & \cdots & S_{n,m} \end{bmatrix}$$

Connaissant *D'*, il est désormais possible de déterminer l'amplitude des différents modes de Zernike d'un front incident quelconque (comportant un nombre de modes égal ou inférieur au nombre de modes utilisés pour déterminer la matrice *D'*) à partir des positions des centroides en effectuant l'opération inverse soit:

$$Z_V = D^+ \cdot S_V \qquad (3.3)$$

La matrice *D'* n'étant pas carrée dans notre cas, nous utiliserons sa pseudo inverse (*D+*) selon la méthode de Moore Penrose, que nous appellerons matrice de reconstruction, pour les calculs.

$$D^+ = (D'^T \cdot D')^{-1} \cdot D'^T \qquad (3.4)$$

Le nombre de modes du front incident qu'il est possible d'identifier dépend du nombre de degrés de libertés du système.Ce nombre de degrés de liberté à priori du système est donné par le nombre de positions de centroides, soit:

$$m = n = 52 + 52 = 104$$

Cependant, les positions de ces centroides ne sont pas toutes linéairement indépendantes, car le front d'onde correspondant est une surface continue. Ceci réduit le nombre de degrés de liberté du système à seulement

$$m = 52 + 8 = 60$$

Ceci permet en fin de compte d'effectuer une décomposition modale sur les 60 premiers modes de Zernike d'un front d'onde aberré. Pour comparaison, dans le cas de l'œil humain, seuls les 20 premiers modes de Zernike ont une amplitude significative. Nous sommes dans ce cas en mesure d'identifier tous ces modes avec cette trame de microlentilles.

CHAMP D'APPLICATION DE L'ALGORITHME LINEAIRE:

Le déplacement du centroide des spots du SH est proportionnel à l'amplitude RMS du mode de Zernike du front incident. Cependant, la position des centroides n'est pas définie de manière univoque en régime de fortes aberrations, à cause de la méthode de détection utilisée. La non linéarité engendrée dans le système rend impossible une reconstruction du front d'onde avec cette méthode.

La pixellisation est une opération non linéaire, ce qui devrait normalement empêcher une reconstruction correcte du front d'onde. Cependant, son influence peut être minimisée par un choix judicieux des paramètres de simulation, car les déplacements des centroides des spots conservent eux une certaine linéarité même après pixellisation.

3.2 REALISATIONS ET DOCUMENTATION

3.2.1 DETERMINATION DE LA MATRICE DE RECONSTRUCTION

CHOIX DU NOMBRE DE MODES DE LA DECOMPOSITION

Le nombre de modes qui doivent être utilisés pour déterminer la matrice de reconstruction doit être supérieur ou égal au nombre de modes présents dans le front d'onde que l'on veut identifier. Si ce nombre de modes est inférieur, alors la reconstruction effectue une décomposition erronée du front. On est alors tenté d'utiliser une décomposition avec le nombre maximum de modes de Zernike que permet le senseur.

En contrepartie, une décomposition en de nombreux modes rend le senseur de fronts d'ondes plus sensible aux perturbations (bruit). Il faut dans ce cas que les images obtenues par la cellule CCD soient d'excellente qualité.

N'ayant que 20 modes à identifier, et des images relativement bruitées, nous avons choisi de n'effectuer une décomposition modale que sur les 20 premiers modes de Zernike.

ETALONNAGE DE LA DETECTION DES CENTROIDES

Avant de commencer à déterminer la matrice *S*, nous effectuons un étalonnage de la position des centroides en prenant pour référence les positions des centroides obtenues à partir d'un front incident plat. Ces positions sont soustraites aux positions simulées pour chaque mode de Zernike. La matrice de reconstruction est ensuite déterminée avec d'après ces nouvelles positions de centroides.

3.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

3.3.1 CARACTERISATION DE LA MATRICE DE RECONSTRUCTION

Afin de vérifier les performances de la matrice de reconstruction *D+*, nous avons simulé une reconstruction d'un front d'onde ne contenant qu'un seul mode avec des amplitudes variables. La valeur RMS de la différence de phase entre le front d'entrée et le front reconstruit détermine l'erreur de reconstruction. La conversion de cette erreur de phase en mètres est obtenue par la relation suivante:

$$\text{metres RMS} = \frac{\lambda}{2\cdot\pi}\text{rad RMS} \qquad (3.5)$$

Un radian correspond dans ce cas à

$$\frac{633\cdot 10^{-9}}{2\cdot\pi} = 1.007\cdot 10^{-7} \approx 10^{-7}\ \text{m}$$

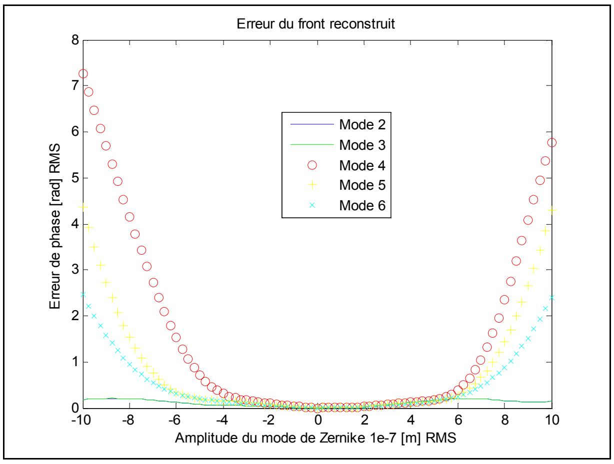


Figure 17 – Erreurs de reconstruction des modes 2 à 6

Les modes supérieurs à 6 ayant une plage d'amplitude plus réduite, les figures mesures suivantes ne seront effectuées que pour des amplitudes comprises dans l'intervalle $\pm 5\cdot 10^{-7}$ m RMS

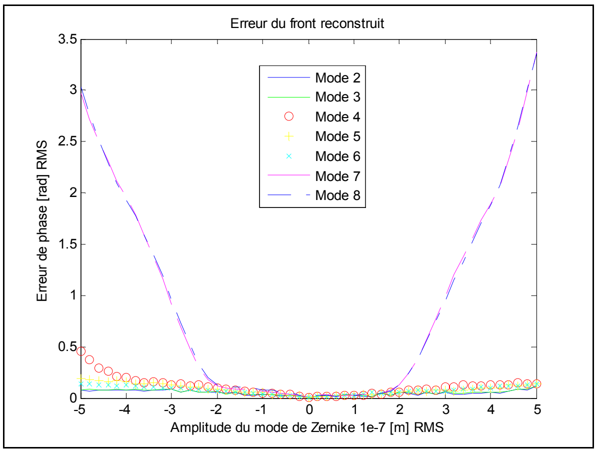


Figure 18 – Erreurs de reconstruction des modes 2 à 8

Mode	Amplitude min / max mesurable RMS [10-7 m]	
2	<-10.0	>+10.0
3	-12	+12
4	-4.5	+6.2
5	-6.4	+6.6
6	-6.8	+7.0
7	-2.4	+ 2.4
8	-2.4	+ 2.4

Tableau 1 – Plage de mesure du reconstructeur pour les modes 2 à 8

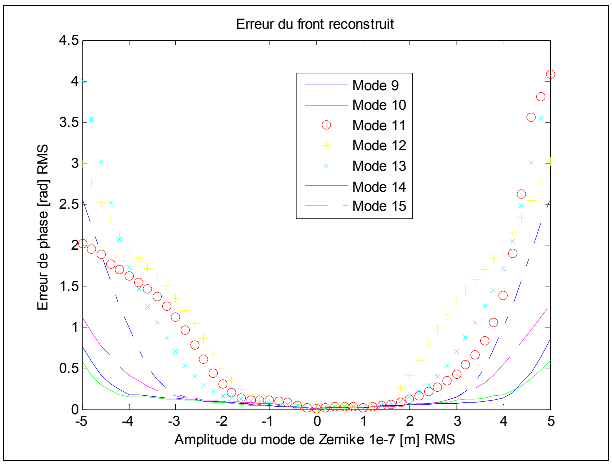


Figure 19 – Erreur de reconstruction des modes 9 à 15

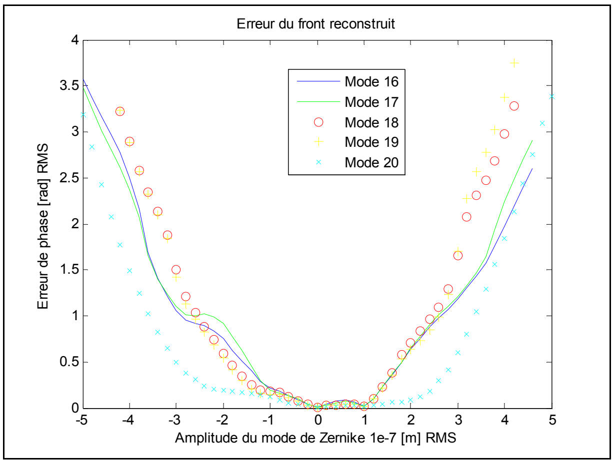


Figure 20 – Erreur de reconstruction des modes 16 à 20

Mode	Amplitude min / max mesurable RMS [10-7 m]	
9	-4.6	+4.6
10	-4.8	+4.6
11	-2.2	+3.0
12	-2.0	+2.0
13	-2.6	+2.6
14	-4.0	+3.8
15	-3.4	+3.6

Tableau 2 – Plage de mesure du reconstructeur pour les modes 9 à 15

Mode	Amplitude min / max mesurable RMS [10-7 m]	
16	-1.4	+1.8
17	-1.4	+1.8
18	-1.8	+1.6
19	-1.8	+1.6
20	-3.0	+2.8

Tableau 3 - Plage de mesure du reconstructeur pour les modes 16 à 20

Ces caractéristiques ont été déterminées sans bruit sur les mesures, ce sont donc les performances maximales du senseur de fronts d'ondes.

L'amplitude minimum et maximale mesurable a été arbitrairement choisie à $0.5 \cdot 10^{-7}$, car c'est pour cette valeur d'erreur que l'on observe, pour la plupart des modes, un coude marqué sur la courbe. Ceci indique que le senseur est passé en régime non linéaire.

4 CONCEPTION DU BANC OPTIQUE

4.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

GENERALITES

Le but de ce montage est d'effectuer la mesure de fronts d'ondes issus de la rétine d'un œil, qui soit également utilisable pour de l'imagerie rétinale par optique adaptative. Ce banc comportera de ce fait les éléments essentiels suivants:

Un système mécanique permettant de positionner l'œil de façon relativement stable.

Un système permettant d'éclairer la rétine de l'œil pour effectuer la mesure des fronts d'ondes ainsi que l'imagerie rétinale.

Un système optique permettant de conjuguer la pupille de l'œil avec un *miroir de renvoi déformable*.

Un système optique permettant de conjuguer le miroir de renvoi déformable avec deux différents senseurs de fronts d'ondes. L'un d'eux est un senseur de courbure dont le développement est assuré par Sébastien Tanniger [[5]], le second est le senseur de Shack Hartmann développé dans le présent rapport.

En nous inspirant de plusieurs bancs optiques de différents articles [[6]] [[7]] [[8]], nous avons pu extraire les données essentielles suivantes:

4.1.1 CONSIDERATIONS SUR L'ŒIL ET SES CARACTERISTIQUES

L'œil humain est constitué de plusieurs parties, qui ont chacune des propriétés différentes quant à la propagation des fronts d'ondes à savoir leurs indices de réfraction. Ces éléments sont la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin, l'humeur vitreuse et la rétine.

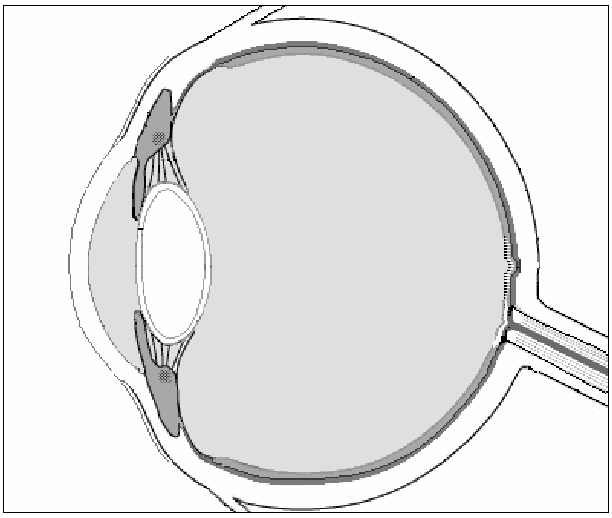


Figure 21 – œil vu en coupe

Le type et l'amplitude des aberrations présentes dans un œil moyen ont été répertoriés par Jason Porter *et al* [[4]].

La principale aberration présente dans un œil correspond au mode 4 de Zernike, il s'agit de la myopie ou de l'hypermétropie (angl. defocus). Les modes 5 à 11 (dont l'astigmatisme) présentent une amplitude environ 10 fois moins importantes. L'amplitude des modes 12 à 20 est quant à elle pratiquement négligeable.

Les modes 1, 2 et 3 de Zernike ne sont pas pris en compte lors d'une décomposition modale du front d'onde, car ils ne correspondent pas à une déformation du front d'onde. Ces modes sont simplement la représentation de la direction dans laquelle l'œil est orienté.

La rétine de l'œil diffuse la lumière sur une zone relativement étendue et difficilement quantifiable lorsqu'elle est illuminée. Cette diffusion dépend entre autres de la longueur d'onde, et elle est plus élevée du coté infrarouge du spectre lumineux.

Un modèle très rudimentaire de l'œil est obtenu en plaçant une plaque de Téflon sur un des foyers d'une lentille convergente de 25 mm de distance focale. Un diaphragme est inséré entre ces deux éléments au plus près de la lentille. D'autres modèles d'yeux ont été développés par Gullstrand [[9]]

4.1.2 DETERMINATION DE LA TECHNIQUE DE MESURE

Dans le cas d'un œil idéal (qui ne présente aucune aberration), un faisceau collimaté qui entre dans l'œil se focalise presque en un point sur la rétine et forme ce que l'on nomme une tache d'Airy. Réciproquement un faisceau qui est issu d'un point de la rétine de cet œil en ressort collimaté.

Ceci nous permet de proposer la technique de mesure suivante:

Admettant que l'on puisse focaliser un faisceau lumineux en un point de la rétine de l'œil, et que celle-ci réfléchisse une partie de l'énergie. Ce point de la rétine peut dans ce cas être considéré comme une source secondaire et ponctuelle (rétro diffusion de la lumière). La lumière émise par cette source sort de l'œil collimatée. Si tel n'est pas le cas, alors l'œil présente des défauts. Ces défauts sont proportionnels aux aberrations du front d'onde sortant de l'œil.

Notons que les aberrations ainsi mesurées ne correspondent qu'à une seule longueur d'onde, celle utilisée pour éclairer la rétine. Elles ne représentent que les aberrations géométriques d'un oeil. Pour déterminer également les aberrations chromatiques, il faudrait procéder à la même expérience avec plusieurs longueurs d'ondes différentes.

VERIFICATION DE L'HYPOTHESE DU CARACTERE PONCTUEL DE LA SOURCE SECONDAIRE.

Le rayon de la tache d'Airy formé sur la rétine par l'œil est donné par:

$$\rho' = \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot f'}{D} \qquad (4.1)$$

ρ' est le rayon de la tache d'Airy pour une longueur d'onde *λ*, alors que *f'* et *D* sont respectivement la distance focale et le diamètre de pupille, de l'œil.

Ce qui dans notre cas présent a pour résultat, si on admet une distance focale de l'œil de 17 mm, un diamètre de pupille de 5 mm et la longueur d'onde de 633 nm:

$$\rho' = \frac{1.22 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot 17 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} \approx 2.6 \cdot 10^{-6} \mathrm{m}$$

Le critère utilisé pour considérer cette tache comme ponctuelle effective est un rapport inférieur à $66.7 \cdot 10^{-3}$ [10] entre le diamètre de cette tache et la distance qui la sépare du récepteur. Dans le cas de l'oeil, cela se traduit, par le rapport entre le diamètre la tache d'Airy et celui de la pupille, et prend la valeur suivante :

$$\frac{2.6 \cdot 10^{-6}}{17 \cdot 10^{-3}} = 0.152 \cdot 10^{-3}$$

Ce résultat satisfait amplement la condition de ponctualité. Cependant, il faut garder à l'esprit que la rétine diffuse la lumière et que la dimension de la source secondaire sera plus étendue que la tache d'Airy seule. Il peut donc s'avérer utile de disposer d'un diaphragme de champ dans un plan conjugué de la rétine pour limiter la dimension de cette zone si la diffusion est trop importante, pour retrouver un caractère ponctuel effectif.

MESURES DES ABERRATIONS STATIQUES

Pour effectuer des mesures statiques (détermination des aberrations statiques), il est primordial que le sujet ne modifie pas les propriétés de son œil durant les mesures. Autrement dit, l'œil doit être au repos et il ne doit pas y avoir d'accommodation. Pour atteindre cet objectif, il faut projeter dans l'œil une image sur laquelle le sujet puisse fixer son regard et son attention. Tant que le sujet voit cette image nette, l'accommodation est négligeable.

L'unité couramment utilisée en ophtalmologie pour exprimer l'amplitude des aberrations est la Dioptrie. La relation entre la valeur RMS du front d'onde que nous mesurons est développée au point 5.1.1

4.1.3 CONSIDERATION SUR LE SYSTEME OPTIQUE ET SES OUVERTURES

L'œil, le miroir de renvoi déformable et le senseur de fronts d'ondes n'ont pas des diamètres d'ouverture identiques. Le diamètre de la pupille de l'œil varie entre 3 et 7 mm, celui du miroir de renvoi déformable est de 12 mm. Le senseur de fronts d'ondes de Shack Hartmann a un diamètre de 2.4 mm alors qu'il doit être de 6 mm pour le senseur de courbure.

Le système optique permettant de conjuguer ces éléments doit pouvoir faire varier le diamètre du faisceau sortant de l'œil pour qu'il corresponde à l'ouverture du miroir déformable et du senseur de fronts d'ondes.

Si le faisceau arrivant sur l'un de ces deux derniers éléments est trop petit par rapport à l'ouverture, alors une partie de l'élément n'est pas utilisée et il y a surdimensionnement. Si en revanche le faisceau est trop grand, alors on perd une partie du front d'onde.

Un système simple qui remplit ces exigences est un système afocal composé de deux lentilles convergentes, le foyer image de la première lentille étant confondu avec le foyer objet de la seconde.

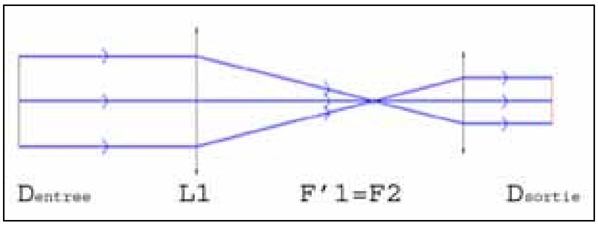


Figure 22 – Système afocal à 2 lentilles convergentes

La relation qui lie les diamètres d'entrée et de sortie du faisceau est:

$$D_{sortie} = D_{entrée} \cdot \frac{f'_2}{f'_1} \; [11] \qquad (4.2)$$

Notons également que le front d'onde est inversé à la sortie de ce système afocal (symétrie axiale autour de l'axe optique).

Avec ce montage, la position des conjugués peut être rapidement déterminée si un objet est dans le plan du foyer objet de la première lentille, son conjugué se situe sur le plan du foyer image de la seconde.

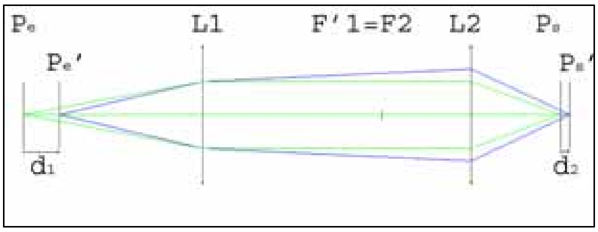


Figure 23 – Positions de conjugués dans un système afocal à 2 lentilles convergentes

Si l'objet n'est pas placé exactement sur le foyer objet de la première lentille, alors la position de son conjugué par rapport au foyer image de la seconde est donné par la relation:

$$d2 = d1 \cdot \left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2 \qquad (4.3)$$

d_1 est l'écart entre l'objet et le foyer objet, d_2 est l'écart entre l'image et le foyer image. f'_1 et f'_2 sont les distances focales des lentilles L1 et L2

Les fronts d'ondes d'entrée et de sortie du système ne sont que similaires, car bien que le système afocal change le diamètre du faisceau, il conserve les différences de phases du front. La valeur RMS du front d'onde est ainsi conservée, mais les pentes sont amplifiées si le diamètre du faisceau est diminué.

La pupille de l'œil, les lentilles, le miroir de renvoi déformable et les diaphragmes, constituent des ouvertures qui limitent la quantité d'énergie qui traverse le système. Pour éviter du vignettage multiple à la sortie du système, donc au niveau du senseur de fronts d'ondes, un seul élément doit limiter l'ouverture du système.

L'élément utilisé pour limiter cette ouverture est un diaphragme à iris qui porte le nom diaphragme d'ouverture. Le vignettage est nul dans les plans conjugués du diaphragme d'ouverture, et augmente si on s'éloigne de ces plans. Dans notre cas ce diaphragme d'ouverture doit se situer dans un plan conjugué des senseurs de fronts d'ondes et de la pupille de l'œil pour limiter le vignettage.

4.1.4 CONSIDERATIONS RADIO PHOTOMETRIQUES

La puissance de l'éclairement de la rétine est limitée, pour des raisons de sécurité. La norme DIN EN 60825-1 permet de déterminer la puissance du faisceau laser qui peut pénétrer dans l'œil en fonction du temps d'exposition et de la longueur d'onde qui sont admissibles pour éviter tout dommage à la rétine et à la cornée.

Le meilleur compromis entre la durée d'exposition et la puissance du laser qui offre les meilleurs résultats n'est pas connu d'avance. L'étude du pire cas permet de poser les limites supérieures.

DETERMINATION DE LA PUISSANCE DE LASER ET DU TEMPS D'EXPOSITION ADMISSIBLES POUR LA MESURE SUR UN ŒIL

Le diamètre minimal de la pupille de l'œil est de 3 mm.

Le temps d'exposition nécessaire pour effectuer une mesure est de moins d'une seconde. Cependant, vu que durant nos investigations nous effectuons des mesures répétées avec des intervalles relativement courts, le temps d'exposition global est supérieur à celui nécessaire aux mesures. Le temps d'exposition est de ce fait porté à 10 minutes.

La longueur d'onde utilisée est de 633 nm.

La puissance correspondant à ces paramètres bien précis est donnée par:

$$MPR = 10^2 \cdot C_3 \cdot C_6 \qquad (4.4)$$ [12]

MPR est l'éclairement maximal au niveau de la cornée (angl. Maximum Permissible Radiance).

$$P = MPR \cdot \frac{1}{t_{exposition}} \cdot A_{pupille} \qquad (4.5)$$

avec $t_{exposition}$, le temps durant lequel l'œil est en face du laser exprimé en [s], $A_{pupille}$ est l'aire de la cornée soumise au faisceau laser [m]. Les constantes C_3 et C_6 sont déterminées de la manière suivante:

$$C_3 = 10^{0.015\cdot(\lambda-550)} \qquad (4.6)$$

$$C_6 = 1 \qquad (4.7)$$

Ceci donne finalement:

$$P = 10^2 \cdot 10^{0.015\cdot(\lambda-550)} \cdot \frac{1}{600} \cdot \frac{\pi\cdot\left(3\cdot10^{-3}\right)^2}{4} = 20\ \mu W$$

P est la puissance du laser [W].

Ne disposant pas d'une formation d'experts dans le domaine de la sécurité des lasers, nous avons ajouté un facteur de sécurité supplémentaire de 1/20 de cette puissance.

Ainsi, la puissance maximale du laser est fixée à 1 µW au niveau de la cornée pour ces paramètres

La réflexion de la rétine étant approximativement de 0.02% [13], la sensibilité de la caméra doit être suffisante pour pourvoir détecter le très faible signal qui ressort de l'œil, soit environ une centaine de pW.

Une fois la sensibilité de la caméra déterminée expérimentalement, la puissance du laser sera amenée à la valeur minimum qui permette d'obtenir des images exploitables pour améliorer le confort du sujet et sa sécurité.

ETALONNAGE DE LA CELLULE CCD

Avant de pouvoir utiliser la cellule CCD pour effectuer des mesures de faisceau il faut d'abord procéder à l'étalonnage. La cellule CCD est intégrée dans une caméra Lumenera 070C. Les images fournies par cette caméra présentent certains défauts reproductibles qui sont dus à l'inhomogénéité des pixels de la cellule CCD.

DEFAUTS DE GAINS DES PIXELS (ANGL. FLAT FIELD)

La réponse des différents pixels de la cellule CCD, à un même signal d'excitation, n'est pas identique pour tous les pixels. C'est ce que l'on nomme le 'Flat Field'. Ces défauts sont très gênants lors de la détermination des centroides par la méthode du centre de gravité.

Pour corriger ce problème, il faut déterminer le gain de chaque pixel, pour ensuite les égaliser.

Celui-ci est obtenu en éclairant uniformément la cellule CCD avec une source Lambertienne, en s'assurant qu'il n'y a pas de saturation des pixels. L'image obtenue fait ainsi ressortir les différents gains. Ces derniers sont

ensuite normalisés par rapport à la moyenne des gains de la caméra.

Nous obtenons de cette façon une matrice caractéristique des gains de chaque pixel. Idéalement, ceux-ci sont unitaires.

L'égalisation des gains s'obtient par la division de l'amplitude mesurée de chaque pixel par son gain propre.

DEFAUTS DES COURANTS DE FUITE (ANGL. DARK FIELD)

Certains pixels de la cellule apparaissent illuminés alors que la caméra est plongée dans l'obscurité. Ce type de défaut est appelé le 'Dark Field'. Il dépend principalement de la température de la cellule CCD. Par conséquent, il doit être mesuré lorsque la caméra est en fonction et sa température stabilisée.

Pour corriger ce problème, il existe plusieurs méthodes plus ou moins satisfaisantes en fonction de l'utilisation des images. La méthode que nous avons choisie consiste à déterminer quels sont les pixels défectueux et définir l'amplitude du signal qu'ils renvoient par rapport au temps d'exposition de la caméra. On soustrait ensuite le produit du temps d'exposition par ces valeurs, aux valeurs mesurées.

Les autres méthodes utilisables consistent à attribuer à ces pixels défectueux une valeur nulle, ou une valeur en fonction des pixels voisins.

4.1.5 CONSIDERATIONS SUR LES ABERRATIONS DES LENTILLES DU SYSTEME

L'aberration propre du système n'est pas réellement pénalisante car il suffit de déterminer ces aberrations pour les soustraire ensuite aux mesures. La méthode d'étalonnage est détaillée au chapitre 5.2.1. Cependant, il est nécessaire de limiter ces aberrations pour rester au centre de la plage de mesure du senseur de fronts d'ondes.

Toutes les lentilles du système sont utilisées pour conjuguer des points à distance finie avec des points à distance infinie. Parmi les lentilles disponibles au laboratoire, les lentilles les mieux adaptées, i.e. qui présentent le moins d'aberrations, pour ce type de conjugaison sont des doublets plan convexes.

Outre le type de lentilles, le diamètre d'ouverture des lentilles joue également un rôle important dans la limitation des aberrations. Un rapport élevé entre la distance focale et le diamètre d'ouverture est synonyme de faibles aberrations.

4.2 Realisations et documentations

4.2.1 Schema du banc

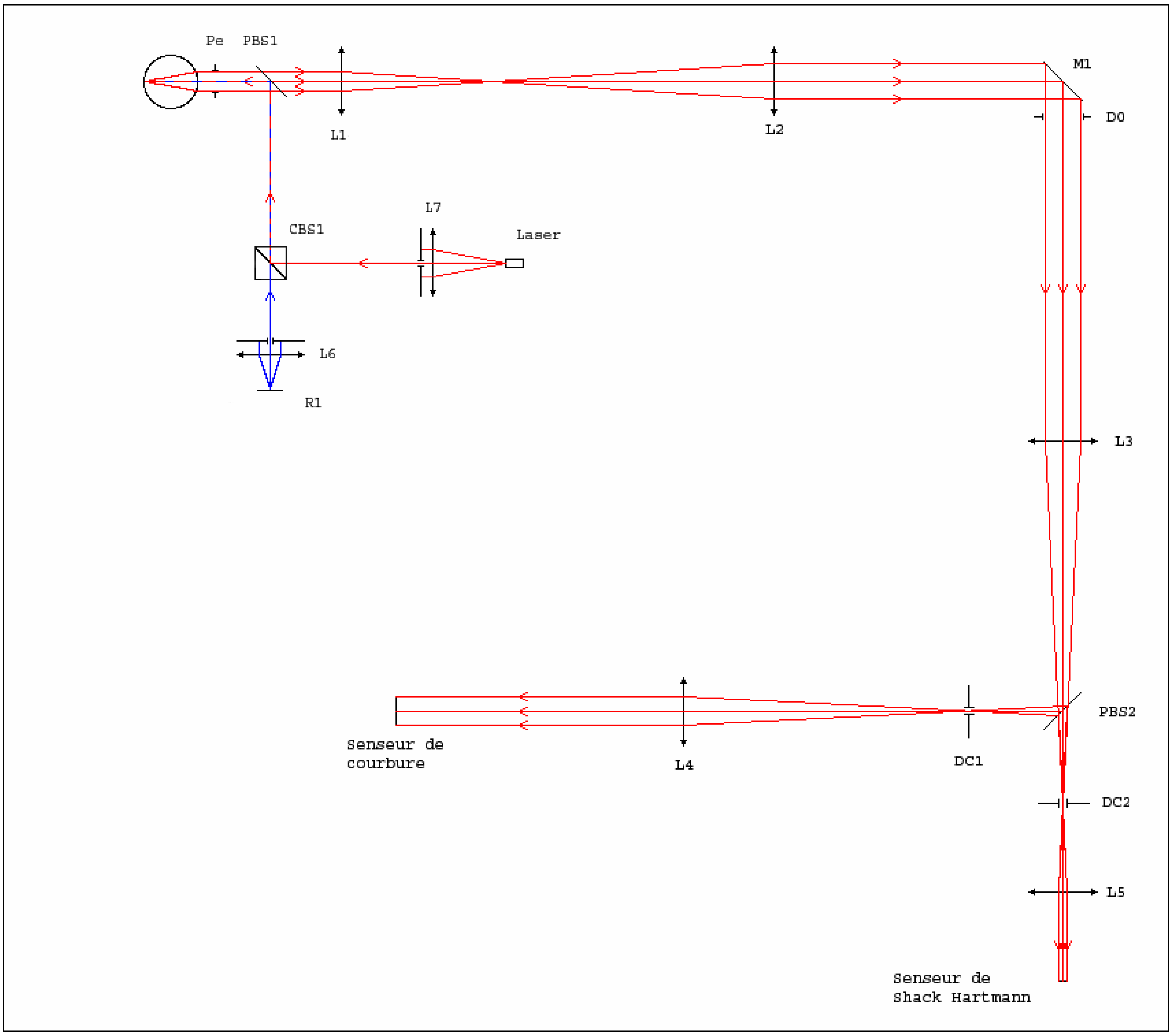


Figure 24 – Schéma du banc optique

Nom	Element	Type	Fabricant	Modèle
L1	Doublet de lentilles	f' = 80 mm	Linos	32 2210
L2	Doublet de lentilles	f' = 200 mm	Linos	06 3205
L3	Doublet de lentilles	f' = 200 mm	Linos	06 3205
L4	Doublet de lentilles	f' = 160 mm	Linos	06 3204
L5	Doublet de lentilles	f' = 50 mm	Linos	32 2265
L6	Doublet de lentilles	f' = 40 mm	Linos	32 2209
L7	Doublet de lentilles	f' = 40 mm	Linos	32 2209
PBS1	Séparateur de faisceau pelliculaire	92% T / 8 % R	Edmund optics	NT 39-478
PBS2	Séparateur de faisceau pelliculaire	50 % T / 50 % R	Edmund optics	NT 39-481
CBS1	Séparateur de faisceau cubique	50 % T / 50 % R	Linos	33 5520
M1	Miroir de renvoi	100 % R		
DC1	Diaphragme de champ à Iris		Linos	06 1650
DC2	Diaphragme de champ à Iris		Linos	06 1650
D0	Diaphragme d'ouverture à Iris		Linos	06 1650
R1	Réticule d'accommodation			

Tableau 4 – Liste des éléments utilisés pour réaliser le banc optique



Figure 25 – Montage optique

4.2.2 EXPLICATIONS

Les lentilles L1 et L2 conjuguent l'œil avec le miroir déformable, les lentilles L3 et L4 conjuguent le miroir de renvoi déformable avec le senseur de courbure, et les lentilles L3 et L5 conjuguent ce miroir avec la trame de microlentilles du senseur de Shack Hartmann.

La pupille de l'œil se situe sur le foyer objet de L1, le miroir se trouve donc sur le foyer image de L2, mais également sur le foyer objet de L3. Le senseur de courbure se situe sur le foyer image de L4 et le senseur de Shack Hartmann est sur le foyer image de L5.

La lentille L6 permet d'améliorer la focalisation du faisceau laser sur la rétine de l'œil. Pour obtenir la meilleure focalisation, la personne à qui appartient l'œil doit voir le réticule net.

Un faisceau laser (λ=633 nm), issu d'une fibre optique monomode, est focalisé sur la rétine de l'œil. Le diamètre de ce faisceau est d'environ 1 mm. Une fraction de l'énergie des rayons est alors réfléchie, traverse les différents éléments de l'œil pour finalement sortir de celui-ci. En ressortant du système optique qu'est l'œil, le front d'onde subit des aberrations caractéristiques des défauts de l'œil.

Lorsque le faisceau laser entre dans l'œil, une partie est réfléchie sur la cornée. L'énergie de cette réflexion étant du même ordre de grandeur que celle réémise par la rétine [14], il est indispensable d'éviter que cette réflexion ne se superpose au front d'onde que l'on veut mesurer. Ce résultat est obtenu en décalant le faisceau laser par rapport à l'axe optique, lorsqu'il entre dans l'œil (angl. off axis illumination). Profitant du fait que la surface de la cornée est bombée, la direction dans laquelle se fait la réflexion n'est pas parallèle à l'axe optique, et elle peut donc être supprimée par un diaphragme de champ approprié.

Les miroirs semi transparents sont formés d'une fine pellicule, ce qui permet d'une part de diminuer les réflexions parasites, et d'autre part on n'introduit pas de changement de chemin optique donc d'aberrations supplémentaires dans le système.

REFLEXIONS DU LASER SUR LES LENTILLES

La première version du banc optique avait pour particularité d'avoir le séparateur de faisceau, PBS1, placé entre les lentilles L1 et L2. Cette variante offrait l'avantage de pouvoir ajuster la focalisation du laser sur la rétine à l'aide d'une lentille supplémentaire placée entre les séparateurs de faisceaux CBS1 et PBS1. La taille de la zone de la rétine qui rétro diffuse la lumière pouvait ainsi être minimisée.

Un inconvénient majeur de cette pratique est la réflexion du faisceau laser sur la lentille L1 qui traverse le système et arrive sur le senseur de fronts d'ondes. Cette réflexion se fait de plus sur la face plane du doublet de lentilles L1. La fraction d'énergie de cette réflexion étant nettement supérieure aux 0.02% de la rétine nous a conduit à mettre au point des techniques qui se sont avérées insuffisante.

Placer un verre polarisant devant le senseur de fronts d'ondes permet de diminuer une grande partie de l'énergie due à cette réflexion qui arrive sur le senseur, mais diminue également de moitié l'énergie issue de la rétine. Le rapport signal sur bruit de cette solution restait en faveur du bruit.

Changer l'angle d'incidence du faisceau laser sur le séparateur de faisceau PBS1, modifie également l'angle de réflexion

Placer un diaphragme de champ sur un plan conjugué de la rétine peut éliminer une bonne partie de l'énergie de cette réflexion, mais nécessite un positionnement très précis de l'œil du sujet.

4.2.3 ALIGNEMENT DU BANC OPTIQUE

L'alignement correct du banc optique ainsi qu'un positionnement optimal des lentilles permet de réduire les aberrations propres du système. Ces aberrations peuvent être déterminées avec un faisceau laser et le senseur de front d'onde. Pour cela, il suffit de comparer les fronts d'entrée et de sortie du système.

REGLAGE DU FAISCEAU LASER

Le faisceau laser issu d'une diode laser est amené sur le banc optique via une fibre optique monomode. Le diamètre de la fibre optique utilisée est de 4 µm et son ouverture numérique *NA* est de 0.12. Ce qui nous permet de considérer l'extrémité de la fibre optique comme étant une source ponctuelle, et dont le demi angle d'ouverture du faisceau, *α*, est de:

$$NA = n' \cdot \sin\alpha' \qquad (4.8)$$

soit

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{NA}{n'}\right) = \arcsin\left(\frac{0.12}{1}\right) \approx 7°$$

NA est l'ouverture numérique de la fibre optique, *n'* est l'indice de réfraction de l'air.

En plaçant une lentille convergente après cette fibre, nous pouvons obtenir un faisceau collimaté si le foyer objet de cette lentille est confondu avec l'extrémité de la fibre.

Un diaphragme à iris placé après cette lentille permet d'ajuster le diamètre du faisceau laser.

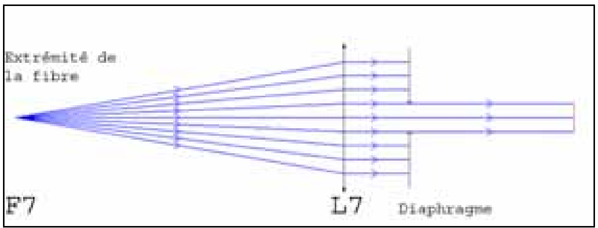


Figure 26 – Elargisseur de faisceau laser

Pour pouvoir mesurer les aberrations du faisceau de sortie, le diamètre de celui-ci doit correspondre à la taille de la trame de microlentilles, soit 2.4 mm.

Le senseur de fronts d'ondes est ensuite placé en face du faisceau laser, pour mesurer les aberrations et régler la position de la lentille pour obtenir un faisceau collimaté.

Le critère utilisé pour déterminer si le faisceau est collimaté est l'absence d'aberrations de mode 4 de Zernike lors de la reconstruction du front d'onde.

A ce stade, la trame de microlentilles n'a pas encore besoin d'être ajustée avec précision par rapport à la cellule CCD. L'explication en est donnée au chapitre suivant.

Le faisceau laser obtenu par ce montage présente encore quelques aberrations dues à la lentille qui n'est pas parfaite et la taille non nulle de la fibre optique.

POSITIONNEMENT DE LA TRAME DE MICROLENTILLES PAR RAPPORT A LA CELLULE CCD

Le foyer image des microlentilles de la trame doit être confondu avec la cellule CCD pour mesurer correctement l'amplitude des aberrations. Le type des aberrations mesurées n'est quant à lui pas affecté par un mauvais positionnement de la trame.

Les positions des centroides déterminées lorsque la trame de microlentilles n'est pas correctement positionnée souffrent d'une erreur proportionnelle à l'erreur de positionnement de la trame. Lorsque les centroides sont confondus avec l'axe optique des lentilles, la position des centroides mesurés ne souffre plus d'aucun décalage quel que soit la position de la trame par rapport à la cellule CCD. Ce cas ne se présente que si le front d'onde incident est plat, et permet donc de régler le faisceau laser.

Lorsque le faisceau laser est bien réglé (collimaté), nous pouvons entamer la procédure de positionnement de la trame de microlentilles. Le critère choisi est basé sur la netteté des images obtenues sur la cellule CCD. Alors que le pic central de la figure de diffraction d'une microlentille paraît net sur une large zone, les pics d'ordre supérieurs ne sont nets que sur une courte zone. Ceci permet de positionner la trame avec une précision de ±1 mm, soit à ±2% de la distance focale de 40 mm. Cette précision est suffisante pour notre application.

D'autres critères tels que le rapport de Strehl de la figure de diffraction permet de déterminer de manière plus précise la position de la trame de microlentilles par rapport à la cellule CCD. La meilleure position de la trame est celle qui présente le rapport de Strehl le plus élevé.

ALIGNEMENT DES LENTILLES

Dans un premier temps, il s'agit uniquement d'aligner les supports de lentilles pour s'assurer que les centres des lentilles sont sur un seul axe, l'axe optique du système.

Pour réaliser cela, nous nous sommes servi d'un faisceau laser de faible diamètre (< 1 mm) et deux diaphragmes à iris. Les diaphragmes sont placés aux endroits des lentilles avec une précision moyenne (< 10 mm). Lorsque les diaphragmes sont totalement fermés, il ne subsiste qu'une petite ouverture. Si le faisceau laser est aligné avec les deux diaphragmes, alors une partie du faisceau traverse le système. Dans le cas contraire, le faisceau est stoppé par un des diaphragmes et l'endroit où le faisceau laser intercepte le diaphragme sert à déterminer la correction à apporter.

Ajustement des couples afocaux L1 et L2, L3 et L4, L3 et L5 :

Le senseur de fronts d'ondes a été utilisé pour déterminer la position relative des couples de lentilles. Les lentilles sont correctement alignées lorsque la décomposition modale présente une amplitude de mode 4 de Zernike nulle ($<10^{-8}$ m RMS).

En général, les aberrations d'un système sont déterminées puis soustraites aux mesures pour

supprimer leur influence, c’est le principe de l’étalonnage.

Dans notre cas de senseur de front d’onde, il y a toutefois une limite quant à l’amplitude de ces aberrations. Pour la reconstruction linéaire, il est indispensable que l’amplitude des aberrations n’engendre pas de non linéarité. La somme des aberrations du système et de celles du front que l’on veut mesurer, ne doit pas dépasser un certain seuil.

Une étude détaillée des types d’alignements ainsi que leur influence sur l’amplitude des aberrations engendrées doit donc être effectuée, le but étant de déterminer quels sont les éléments du système qui doivent bénéficier d’un support permettant un positionnement à plusieurs degrés de liberté.

Le système optique est réalisé par blocs sur une structure microbench® (LINOS photonics), et fixés sur une table de type Newport.

La précision de positionnement des éléments sur la partie microbench® n’a pu être obtenue auprès du fabricant, mais on peut fixer des valeurs provisoirement d’après des constatations pratiques. Ainsi l’erreur de positionnement d’un élément est fixée à:

Axe longitudinal 0.1 mm,

Axe transversal et sagittal 0.1mm,

Inclinaison 0.5°.

Ces paramètres sont introduits dans la simulation ZEMAX du système, afin de déterminer les aberrations correspondantes.

4.2.4 Etude de l’influence de l’alignement des elements sur les aberrations du systeme.

Les aberrations propres du système doivent être prises en compte lors de la conception afin des limiter au maximum. Moins le système présente d’aberrations, plus nous serons en mesure d’identifier des types d’aberrations avant de passer en régime de fortes aberrations avec le senseur de fronts d’ondes.

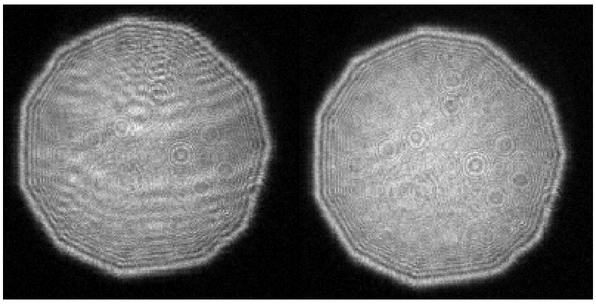
De plus, cette étude nous permet de déterminer quels sont les éléments qui nécessitent d’un support à plusieurs degrés de liberté.

Les aberrations nominales, minimales, maximales et typiques du système sont déterminées par le logiciel de design optique ZEMAX.

Pour déterminer ces aberrations, le logiciel s’appuie sur les tolérances des différentes lentilles du système ainsi que des erreurs de positionnement. Les tolérances sont fournies par le fabricant de lentilles, alors que nous devons déterminer nous-mêmes les erreurs de positionnement par approximations. Le détail des calculs est détaillé en annexe.

4.2.5 Verification de la qualite et la proprete des elements optiques

Des grains de poussière sur une lentille peuvent conduire à une dégradation désastreuse de la qualité du faisceau laser, en provoquant de la diffraction. La distribution d’énergie en différents points du faisceau n’est plus identique en tous points et dégrade par conséquent la qualité des spots obtenus sur la cellule CCD.



(a) (b)

Figure 27 – Image du faisceau laser sur le CCD, (a) avec et (b) sans poussières sur les lentilles.

Notons que l’homogénéité du faisceau n’est pas encore parfaite, car certaines poussières ou défauts intrinsèques des lentilles subsistent.

4.2.6 Determination de la sensibilite energetique de la cellule CCD

L’énergie nécessaire qui arrive sur le senseur de fronts d’ondes, pour pouvoir obtenir un rapport signal sur bruit suffisant, été déterminée expérimentalement.

Le gain analogique de la caméra a été fixé à 1.

La puissance du laser a été mesurée à l’aide d’un puissance mètre modèle *Newport Power meter 815*. En plaçant des filtres neutres de référence entre le laser et la caméra, et en variant le temps d’exposition de celle-ci, nous avons pu déterminer de cette manière cette énergie.

4.3 Resultats experimentaux et analyse

4.3.1 Simulation du systeme

Alignement	Amplitude RMS des aberrations [10^{-7} m]
Nominal	0.0006
Meilleur	0.0290
Pire	0.2069
Moyen	0.1136

Tableau 5 – Aberrations prévues du banc optique

Les aberrations prévues sont inférieures à $0.2 \cdot 10^{-7}$ m en moyenne. Le senseur étant en régime linéaire pour ces aberrations, nous pouvons donc réaliser le montage en respectant les tolérances fixées.

Afin de déterminer approximativement le type d'aberrations provoquées par un type d'alignement, nous avons également étudié brièvement chaque type d'alignement et observé l'aberration correspondante. Les modes les plus fréquents d'aberrations sont les modes 2, 3 et 4 de Zernike. Les modes 2 et 3 sont relativement aisément corrigés, par un étalonnage. Seul le mode 4 doit être soigneusement réduit.

Les types d'alignements correspondent au nombre de degrés de liberté des éléments, soit 5 pour la majeure partie d'entre eux (longitudinal, transversal, sagittal, tip, tilt).

Les aberrations relatives aux modes de Zernike 1, 2, et 3 (piston tip et tilt), ne dérangent pas trop, quelles que soient leurs amplitudes, pour autant que les spots se forment sur la cellule CCD. Ces aberrations sont principalement dues à l'alignement transversal et sagittal des éléments du banc.

Les aberrations de type defocus mode 4 de Zernike, sont dues à un mauvais alignement des éléments selon l'axe longitudinal.

On peut déterminer quels sont les éléments du banc qui doivent être positionnés sur des supports réglables

4.3.2 Reglage du faisceau laser

Lorsque la lentille L7 est positionnée correctement, le faisceau laser présente une amplitude d'aberration du mode 4 de Zernike inférieure à 10 nm RMS, après décomposition modale. Le diamètre du faisceau est alors de 2.4 mm pour correspondre à l'ouverture de la trame de microlentilles.

4.3.3 Determination de la sensibilite energetique de la cellule CCD

La puissance du laser, sans filtre, est de 0.388 μW.

Les résultats sont les suivants

Filtre	exposition [ms]	N_{moy}	Energie/niveau [J]
D3	100	20	$1.94 \cdot 10^{-12}$
D3.3	100	10	$1.90 \cdot 10^{-12}$
D3.3	1000	100	$1.90 \cdot 10^{-12}$
D3.7	1000	40	$1.93 \cdot 10^{-12}$
D4	1000	20	$1.94 \cdot 10^{-12}$

Tableau 6 – Sensibilité énergétique du senseur de fronts d'ondes

N_{moy} est la moyenne des niveaux maximum des spots pour un temps d'exposition donné. Les filtres utilisés sont caractérisés par un indice de densité optique D_X.

Le facteur de transmission t correspondant à cet indice est donné par:

$$t = 10^{-Dx} \qquad (4.9)$$

D'après nos observations, un bon rapport signal sur bruit est obtenu avec des spots ayant un niveau maximum de 50, l'énergie correspondante est d'au moins 10^{-10} [J] par exposition. Cette énergie de ce fait un facteur qui limite la fréquence de mesure des aberrations de l'œil.

5 MESURES DE FRONTS D'ONDES

5.1 DESCRIPTION ET ANALYSE THEORIQUE

5.1.1 MESURES DE LENTILLES OPHTALMIQUES

La mesure de lentilles ophtalmiques sert à vérifier, sinon établir, la relation qui lie les Dioptries (unité utilisée en ophtalmologie) à nos mesures de fronts d'ondes exprimées en µm RMS. La relation (5.2) ne peut être utilisée à cet effet, car elle n'est pas suffisamment précise.

En plus de cette relation, ces mesures permettent de vérifier le comportement linéaire du senseur de fronts d'ondes.

Nous nous basons sur l'hypothèse que l'aberration du front d'onde après passage à travers cette lentille est donné par la valeur indiquée sur la lentille.

DETERMINATION DE LA RELATION ENTRE DIOPTRIES ET µM RMS

Le développement suivant est basé sur une analyse géométrique.

Une dioptrie correspond à un front d'onde sphérique qui a un rayon de courbure égal à 1 m.

Le mode 4 des polynômes de Zernike Z_4 décrit un paraboloïde de révolution.

En approximant une calotte de sphère par une calotte de parabole, il est possible d'établir une relation entre les Dioptries et la valeur RMS du mode 4 de Zernike. Cette approximation est possible du fait que l'angle sous-tendu par la pupille est beaucoup plus petit que le rayon de courbure de la sphère, ce qui permet de faire une approximation des petits angles.

La relation qui lie les dioptries aux µm RMS est donnée par la relation suivante:

$$SEP = \frac{4 \cdot \sqrt{3} \cdot Z_4}{r^2} \quad [15] \qquad (5.1)$$

SEP est l'aberration exprimée en dioptries, *r* est le rayon de la pupille en mm, et Z_4 est l'aberration RMS du mode 4 de Zernike exprimée en µm:

5.1.2 MESURES DES ABERRATIONS D'UN ŒIL

Le but de cette opération est de déterminer les aberrations de l'œil, ainsi que leurs évolution au cours du temps. Ces mesures permettent d'effectuer une cartographie détaillée de l'œil avant une opération LASIK, ou constituent la mesure du front d'onde dans un système d'optique adaptative pour l'imagerie rétinale.

Les aberrations de l'œil seront décomposées selon les 20 premiers modes de Zernike.

5.2 REALISATIONS ET DOCUMENTATIONS

5.2.1 MESURES DE LENTILLES OPHTALMIQUES

Les lentilles utilisées pour nos mesures sont des verres sphériques qui présentent des corrections allant de -1 à +1 Dioptries prévus pour la correction des défauts de type myopie et hypermétropie d'un œil.

Une modification est apportée au montage pour effectuer ces mesures. La partie du montage précédant la lentille L1 devient alors:

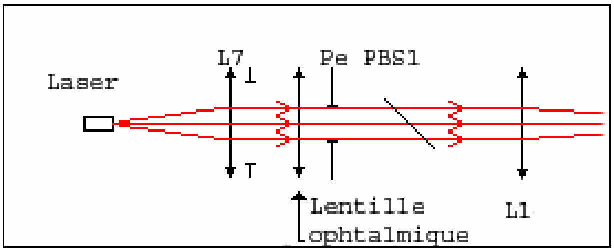


Figure 28 – Mesure de lentilles ophtalmiques

Les lentilles ophtalmiques sont placées à l'endroit de la pupille de l'œil. Elles se trouvent alors sur un plan conjugué avec le miroir de renvoi déformable et les senseurs de fronts d'ondes. La partie qui génère le faisceau laser est déplacée derrière ces lentilles ophtalmiques. La lentille L7 ainsi que l'extrémité de la fibre optique du laser conservent la même position relative, car ils sont fixés sur le même support. Il n'y a pas besoin de vérifier que le faisceau laser soit toujours parallèle. Le diaphragme qui limitait l'ouverture du faisceau laser est désormais totalement ouvert.

La puissance du laser a dû être diminuée à l'aide de filtres neutres pour éviter une saturation de la cellule CCD.

5.2.2 MESURES DES ABERRATIONS D'UN ŒIL

La mesure de fronts d'ondes sur un œil humain s'est révélé être un exercice relativement délicat pour plusieurs raisons

MOUVEMENTS DE L'ŒIL

La fixation rigide de la tête par rapport au banc optique diminue les mouvements de l'œil. Les moyens utilisés pour stabiliser la tête sont constitués de barres métalliques. Le menton repose sur une barre, le sujet peut appuyer son front sur une autre, et deux barres viennent se placer sur les tempes pour bloquer la tête. Un mord a également été prévu pour limiter encore ces mouvements.

Ce système permet de maintenir fermement la tête, mais son inconvénient majeur réside dans le fait qu'il est difficilement ajustable. Par conséquent, il n'a pas pu être utilisé efficacement durant les mesures, car la tête

devait garder un peu de liberté pour permettre au sujet d'effectuer lui-même le réglage final.

Pour améliorer ce système, il faudrait le placer sur un support à 3 degrés de liberté. La tête serait alors fermement mise en place, puis déplacée soigneusement à l'aide de vis de translation jusqu'à la position correcte.

TEMPS D'EXPOSITION DE LA CAMERA

Ce temps correspond en fait à la période d'échantillonnage des aberrations de l'œil. Cette période est limitée par le temps nécessaire pour effectuer une acquisition d'image avec la caméra qui est au minimum de 100 ms. La sensibilité de la cellule CCD est quant à elle suffisante pour avoir un rapport signal sur bruit exploitable pour cette durée d'exposition.

Des temps d'exposition de plus d'une seconde permettent d'augmenter nettement le rapport signal sur bruit, mais les fréquences des aberrations que l'on veut observer, ainsi que celles des mouvements involontaires de l'œil sont supérieures à 1 Hz. Par conséquent, les images obtenues avec de tels temps d'expositions sont souvent floues et difficilement exploitables.

REFLEXIONS SUR LA CORNEE

La quantité de lumière réfléchie par la cornée qui traverse le système et arrive sur le senseur de fronts d'ondes n'est pas toujours nulle.

L'illumination de l'œil avec la méthode d'illumination hors axe, décrite au point 0, n'a pas pu être mise pleinement à profit, notamment à cause du fait que l'œil du sujet dispose d'encore un peu de liberté de mouvement.

RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT (ANGL. S/N RATIO)

La zone de la rétine qui rétro diffuse la lumière n'est pas rigoureusement ponctuelle. L'énergie de chaque point de cette zone traverse également le système et vient s'ajouter au signal. Ceci introduit un effet flou sur les images observées, et constitue donc une source de perturbations.

Le diaphragme de champ placé au conjugué de la rétine qui permet de diminuer cette zone n'a pas non plus pu être mis pleinement à profit. Par le fait même qu'il limite le champ, il coupe une grande partie du faisceau utile lorsque l'œil n'est pas positionné de manière adéquate (sur l'axe optique). Nous avons de ce fait dû augmenter le diamètre d'ouverture de ce diaphragme pour pouvoir obtenir des images exploitables.

Là encore, un positionnement plus stable de l'œil permet de réduire le diamètre du diaphragme de champ et améliore de ce fait le rapport signal sur bruit

PROTOCOLE DE MESURE

Le laser est enclenché et la puissance de celui-ci est réglée au minimum, soit une dizaine de nW.

Le sujet se met en position sur le banc optique et fixe les barres en laissant un peu de liberté de mouvement pour sa tête. Il se sert du faisceau laser pour se positionner grossièrement. (une bonne approximation de cette position est la vue d'un point plus intense).

Une fois le sujet bien positionné, la puissance du laser est alors augmentée à sa valeur nominale. Un collaborateur observe à l'aide de la caméra du senseur de courbure, que l'œil soit bien placé sur l'axe optique et indique au sujet les corrections à apporter (le sujet est bien positionné si les spots sont visibles sur la caméra).

Les mesures sont lancées lorsque cette dernière étape est effectuée avec succès.

Durant les mesures, le sujet s'efforce de ne pas bouger et de ne pas effectuer d'accommodation. Son regard se porte sur un point à l'infini. Il cligne également le moins possible.

Un signal sonore prévient dès la fin des mesures et le sujet peut alors fermer les yeux et le collaborateur diminue au minimum la puissance du Laser. Le sujet se retire ensuite du banc optique.

5.3 Resultats experimentaux et analyse

5.3.1 Mesures de lentilles ophtalmiques

Resultats

La figure ci-après présente les aberrations des mode 4 à 20 de Zernike mesurées avec le senseur de fronts d'ondes et la reconstruction linéaire, pour différentes aberrations simulées à partir de lentilles ophtalmiques.

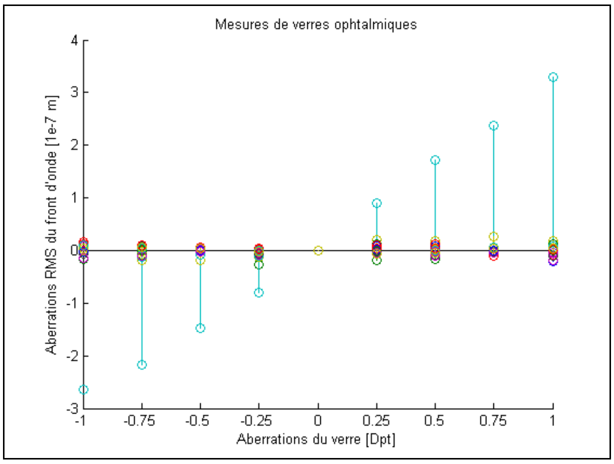


Figure 29 – Mesures de verres ophtalmiques

Les points qui ressortent clairement correspondent au mode 4 de Zernike. Ces points forment une droite dont le coefficient de corrélation est de 0.9979.

La pente de la droite formée par ces points est de $3.14 \cdot 10^{-7}$ m / dpt

La pente théorique de cette droite est trouvée d'après la formule (5.1), et vaut $5.32 \cdot 10^{-7}$.m / dpt

Analyse

Ces observations démontrent le caractère linéaire de la relation entre ces deux grandeurs dans l'intervalle considéré.

Les aberrations supérieures à ±1 dpt amènent le senseur vers le régime non linéaire. La linéarité du senseur en dehors de cette plage n'a pas été vérifiée et ne peut par conséquent être garantie. La plage de mesure garantie s'étend de -1 à +1 dpt, soit -0.3 à +0.3 µm RMS.

5.3.2 Mesures des aberrations d'un œil

Resultats

Les figures suivantes présentent les aberrations d'un œil sur une durée de 12 s, à raison de 5 mesures par seconde. Les aberrations minimum, maximum et moyenne de chaque mode ont été mises en évidence.

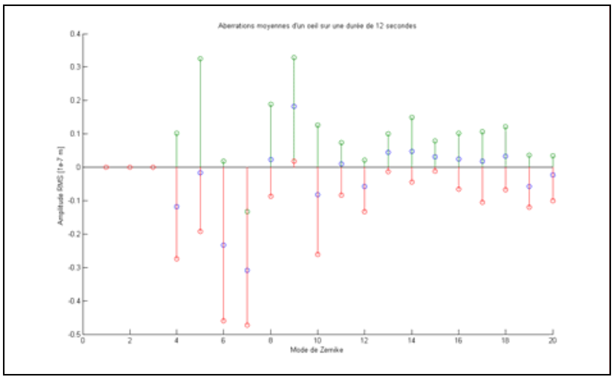
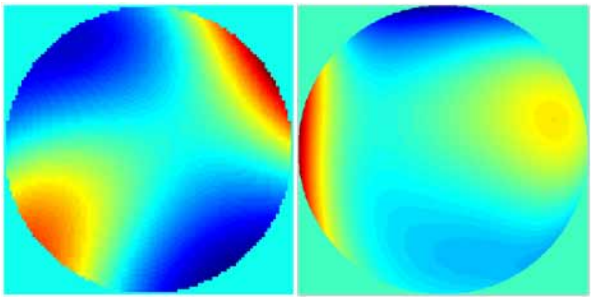


Figure 30 - Aberration moyennes d'un œil pour une période de 12 [s]

Le front d'onde correspondant à la moyenne de cette décomposition modale est comparé à celui obtenu par le senseur de courbure de S.Tanniger.



(a) (b)

Figure 31 – Front mesuré avec le senseur de courbure (a) et avec le senseur de Shack Hartmann (b)

Les différences qui existent entre les deux mesures peuvent s'expliquer en partie par le fait que les deux fronts ne sont pas mesurés au même instant. De plus, les caméras qui ont effectué ces mesures n'ont pas la même orientation par rapport au banc optique. Il convient donc d'effectuer les rotations nécessaires entre les deux images pour pouvoir effectuer une comparaison. Les rotations nécessaires sont déterminables en utilisant des fronts d'ondes de référence, du type astigmatisme pour déterminer l'orientation, et coma pour déterminer le sens.

E. Hofmann

L'évolution au cours du temps de ces mêmes aberrations permet d'obtenir différentes caractéristiques de l'œil.

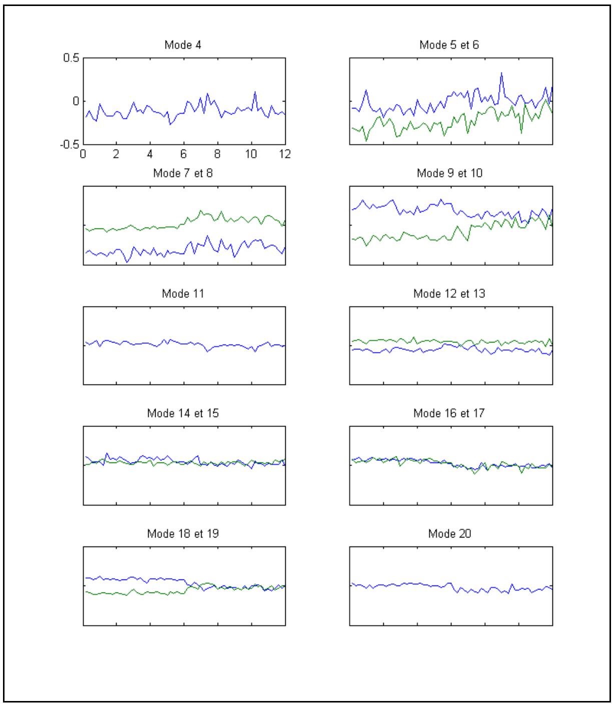


Figure 32 – Evolution temporelle des aberrations

Les temps sont donnés en secondes et les amplitudes en 10^{-7} m RMS. Les échelles sont les mêmes pour chaque graphique.

Les aberrations des modes 4 à 10 présentent les variations les plus importantes. Les modes supérieurs n'ont quant à eux que de faibles variations.

Les mesures effectuées présentent un caractère non stationnaire.

ANALYSE

Le caractère non stationnaire observé peut être dû à plusieurs phénomènes.

Le bruit est typiquement non stationnaire, cependant, il est généralement aléatoire et ne permet pas d'expliquer à lui seul la non stationnarité observée.

Les mouvements de l'œil sont également non stationnaires, mais ces mouvements ne peuvent engendrer que des aberrations sur certains modes, et avec des fréquences relativement basses à cause de l'inertie de la tête. La non stationnarité observée n'est donc pas non plus due uniquement aux mouvements de l'œil.

L'œil est par sa constitution un système qui possède un caractère non stationnaire. C'est donc à lui que nous pouvons attribuer la dernière partie de non stationnarité.

Ces considérations nous permettent d'expliquer en quoi l'optique adaptative en ophtalmologie offre la possibilité d'atteindre une résolution supérieure aux systèmes traditionnels.

Les systèmes traditionnels (lunettes, jumelles, lentilles de contact, et même LASIK) ne peuvent corriger que les aberrations stationnaires, car les corrections qu'ils apportent sont également stationnaires. Les défauts de l'œil ne sont de plus mesurés qu'à un seul instant précis dans le temps. Les modes qu'ils corrigent se limitent généralement aux modes 4, 5 et 6. La technique LASIK offre toutefois une meilleure correction car elle peut corriger un plus grand nombre de modes.

L'optique adaptative, quant à elle, peut, comme son nom l'indique, adapter la correction à apporter en fonction des aberrations courantes de l'œil. Les aberrations stationnaires et non stationnaires sont de ce fait corrigées. Le nombre de modes corrigés dépend du senseur ainsi que du miroir de renvoi déformable, mais peut atteindre 20 modes dans notre cas.

Une analyse plus détaillée peut également permettre de déterminer quels sont les éléments de l'œil qui possèdent un caractère stationnaire ou non, et si ils sont non stationnaires, déterminer en plus s'ils sont aléatoires. Une opération LASIK se doit être effectuée sur un élément à caractère stationnaire. Dans le cas contraire, les corrections auront, elles aussi, un caractère non stationnaire, mais non aléatoire.

Les fluides ainsi que les éléments solides mous ont par nature un caractère non stationnaire. La couche de liquide sur la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitreuse entrent donc dans cette catégorie. Seule la cornée est suffisamment rigide pour prétendre être stationnaire.

6 CONCLUSIONS

Ce senseur de fronts d'ondes de Shack Hartmann peut être avantageusement utilisé pour la décomposition modale de fronts d'ondes émanant d'un œil, avec une précision de 10^{-8} m RMS sur les 20 premiers modes de Zernike, pour des amplitudes maximum de 10^{-7} m RMS.

La plage de mesure et la précision dépendent essentiellement des caractéristiques de la trame de microlentilles utilisée. La dynamique du senseur variant comme l'inverse de sa sensibilité.

La puissance du laser, la sensibilité de la caméra ainsi que l'ordinateur utilisés limitent actuellement la fréquence de mesure à 1 Hz.

Cette fréquence pourrait être raisonnablement portée à 3 Hz, en augmentant conjointement la puissance du laser et la puissance de calcul de l'ordinateur.

Des fréquences de mesures plus élevées nécessiteraient de plus profondes modifications, notamment le mise au point d'un système de maintien de la tête plus rigide.

La plage de mesure de ce senseur, utilisé avec une reconstruction linéaire, est limitée aux faibles aberrations. Seuls des yeux qui présentent des faibles défauts peuvent être mesurés (moins de 1 dpt)

Une reconstruction non linéaire devrait permettre d'étendre cette plage de mesures pour permettre de mesurer également des yeux fortement aberrés.

Un miroir déformable pourrait également être utilisé pour corriger ces aberrations et ramener le senseur en régime linéaire. Cependant, la correction à apporter devrait être connue à priori.

Yverdon, le 14 décembre 2004, Eric Hofmann

ANNEXE 1 – LES POLYNOMES DE ZERNIKE

Les polynômes de Zernike sont utilisés en optique pour décrire les aberrations (ou différences de phases) d'un front d'onde par rapport à un plan de référence, délimité par une ouverture de forme circulaire.

Les polynômes sont construits d'après les relations suivantes:

$$Z_n^m(r,\theta) = \sqrt{n+1} \cdot R_n^m(r) \cdot \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \cos(m \cdot \theta) \\ \sqrt{2} \cdot \sin(m \cdot \theta) \\ 1(m=0) \end{cases}$$

ρ étant la distance radiale où $0 \leq \rho \leq 1$, et θ est l'angle azimutal où $0 \leq \theta \leq 2\pi$. La valeur RMS de cette fonction est normalisée à 1 grâce au premier facteur.

La fonction $R_n^m(r)$ est donnée par la relation suivante:

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s \cdot (n-s)!}{s![(n+m)/2-s]![(n-m)/2-s]!} \cdot r^{n-2 \cdot s}$$

m et n sont des nombres entiers et $n \geq m \geq 0$. L'index n est appelé degré radial et l'index m fréquence azimutale.

Il existe une infinité de polynômes. Pour les distinguer, chacun de ces polynômes est repéré par un numéro, que l'on nomme mode, qui dépend des paramètres n et m qui ont servi à construire le polynôme. La notation est alors: Z_i, i étant le numéro du mode.

Ces modes ont plusieurs particularités, dont celle d'être orthogonaux. Cela signifie qu'un mode ne peut pas être obtenu par une combinaison linéaire d'autres modes. On peut faire l'analogie des modes de Zernike à un espace à plusieurs dimensions où chaque mode correspond à une dimension (le déplacement le long d'une dimension n'affecte pas la position sur les autres dimensions).

L'orthogonalité est définie mathématiquement par les relations suivantes:

Dans le cas où la fonction est continue:

$$\int\int_{\text{pupille}} Z_a \cdot Z_b \cdot d_x \cdot d_y = \delta_{ab}$$

Dans le cas où la fonction est discrétisée (simulation numérique).

$$\sum\sum Z_a[k_x, k_y] \cdot Z_b[k_x, k_y] = \delta_{ab}$$

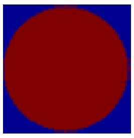
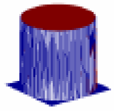
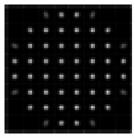
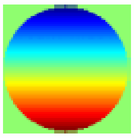
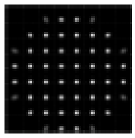
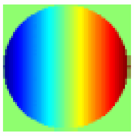
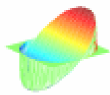
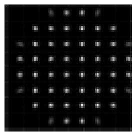
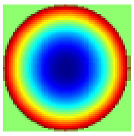
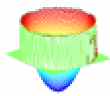
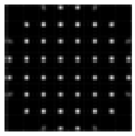
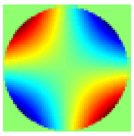
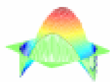
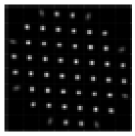
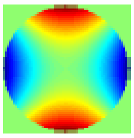
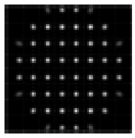
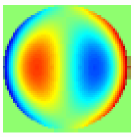
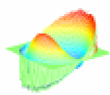
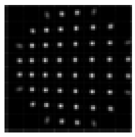
$$\delta_{ab} \begin{cases} 1 \text{ si } a = b \\ 0 \text{ si } a \neq b \end{cases}$$

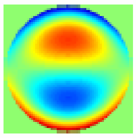
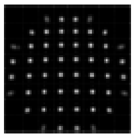
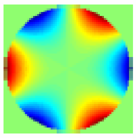
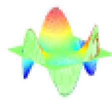
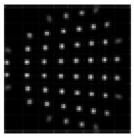
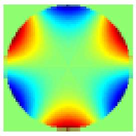
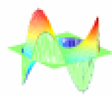
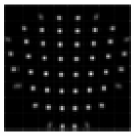
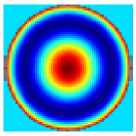
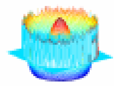
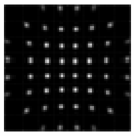
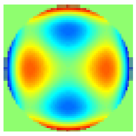
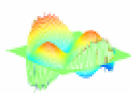
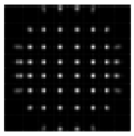
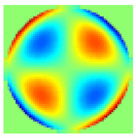
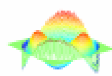
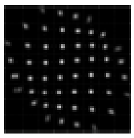
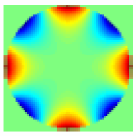
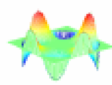
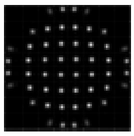
k_x et k_y sont les indices de la matrice qui représente le polynôme de Zernike.

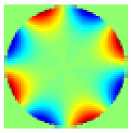
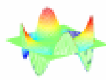
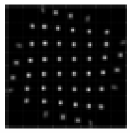
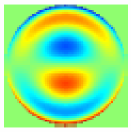
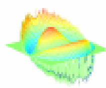
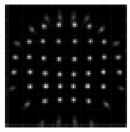
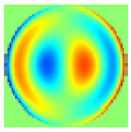
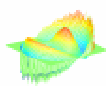
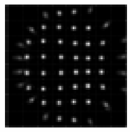
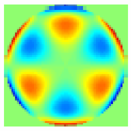
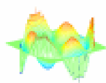
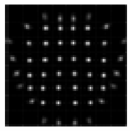
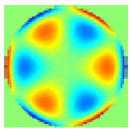
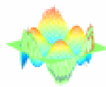
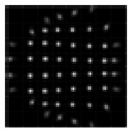
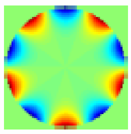
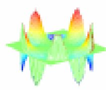
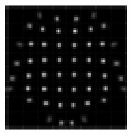
En d'autres termes, le produit scalaire d'un mode avec n'importe quel autre mode est toujours nul, tandis que le produit scalaire d'un mode avec lui-même est unitaire. Ces conditions servent à déterminer si des modes sont orthogonaux ou non.

Cependant, il faut noter qu'une discrétisation due à un échantillonnage lors de la simulation dégrade cette propriété. Il est donc utile de vérifier lors d'une simulation numérique, que le nombre d'échantillons utilisés pour construire le front d'onde est suffisant pour conserver au mieux cette propriété d'orthogonalité.

La seconde propriété des polynômes de Zernike est qu'ils sont construits de manière à ce que la valeur RMS ne peut qu'augmenter lors d'une combinaison de plusieurs modes.

Mode			Nom	Polynôme	Représentations		
k	n	m		$z_k(\rho,\theta)$			Spots SH
1	0	0	piston	1			
2	1	1	tip	$\rho\cos(\theta)$			
3	1	1	tilt	$\rho\sin(\theta)$			
4	2	0	defocus	$\sqrt{3}\cdot(2\rho^2-1)$			
5	2	2	astigmatism	$\sqrt{6}\sin(\theta)\cdot\rho^2$			
6	2	2		$\sqrt{6}\cos(\theta)\cdot\rho^2$			
7	3	1	coma	$\sqrt{8}\sin(\theta)\cdot(3\rho^3-\rho^2)$			

Mode			Nom	Polynôme	Représentations		
k	n	m		$z_k(\rho,\theta)$			Spots SH
8	3	1		$\sqrt{8}\cos(\theta)\cdot(3\rho^3-\rho^2)$			
9	3	3	trefoil	$\sqrt{8}\sin(3\theta)\cdot\rho^3$			
10	3	3		$\sqrt{8}\cos(3\theta)\cdot\rho^3$			
11	4	0	spherical	$\sqrt{5}\cdot(6\rho^4-6\rho^2+1)$			
12	4	2		$\sqrt{10}\cos(2\theta)\cdot(10\rho^4-3\rho^2)$			
13	4	2		$\sqrt{10}\sin(2\theta)\cdot(10\rho^4-3\rho^2)$			
14	4	4	ashtray	$\sqrt{10}\cos(4\theta)\cdot\rho^4$			

Mode			Nom	Polynôme	Représentations		
k	n	m		$z_k(\rho,\theta)$			Spots SH
15	4	4		$\sqrt{10}\sin(4\theta)\cdot\rho^4$			
16	5	1		$\sqrt{12}\cos(\theta)\cdot(10\rho^5-12\rho^2+3\rho)$			
17	5	1		$\sqrt{12}\sin(\theta)\cdot(10\rho^5-12\rho^2+3\rho)$			
18	5	3		$\sqrt{12}\cos(3\theta)\cdot(5\rho^5-4\rho^3)$			
19	5	3		$\sqrt{12}\sin(3\theta)\cdot(5\rho^5-4\rho^3)$			
20	5	5		$\sqrt{12}\cos(5\theta)\cdot\rho^5$			

ANNEXE 2 - LISTE DES SYMBOLES

- X: position du point de focalisation dans le plan image par rapport à l'axe optique [m]
- f': distance focale image d'une lentille [m]
- α: angle d'inclinaison du front d'onde, par rapport à un plan normal à l'axe optique [rad]
- φ: matrice qui décrit les différences de phases d'un font d'onde [rad]
- a: amplitude RMS des phases d'un front d'onde [rad]
- x,y repère cartésien [m]
- P: nombre d'éléments utilisés pour calculer la valeur RMS d'un front d'onde [-]
- Nb: nombre d'éléments (ou échantillons) par ligne de la matrice du front d'onde [-]
- n: nombre de microlentilles par ligne de la trame [-]
- D: longueur de l'arête d'une microlentille [m]
- de: distance entre 2 échantillons (ou période d'échantillonnage) [m]
- F: matrice qui décrit le front d'onde en phase et en amplitude
- g_f : facteur de garde [-]
- N: nombre d'éléments par ligne de la matrice avant transformée de Fourier [-]
- ω_x: pulsation spatiale correspondant à la pente du front d'onde
- k: nombre d'onde de la lumière utilisée
- $\Delta\omega_x$: pulsation spatiale entre 2 éléments de la matrice du front d'onde [rad]
- ΔX: distance qui sépare 2 éléments da la matrice image [m]
- λ: longueur d'onde de la lumière utilisée [m]
- f'_m: distance focale des microlentilles [m]
- f_{max}: fréquence spatiale maximum du front d'onde avant repliement spectral [m^{-1}]
- ω_{max}: pulsation spatiale maximum du front d'onde avant repliement spectral [m^{-1}].
- dec: nombre d'éléments de la matrice image qui correspondent à la projection d'une microlentille [-]
- C: position du centroide par rapport à l'axe optique [m]
- x_c,y_c: composantes selon l'axe x et y de la position du centroide [m]
- I: intensité de l'énergie d'un élément de la matrice image [-]
- Δn: déplacement du centroide sur la matrice image [pixels]
- ΔC: déplacement du centroide sur le plan image [m]
- d_{pix}: taille d'un pixel [m]
- D': matrice caractérisant le système linéaire
- Z_V: vecteur contenant les amplitudes RMS des modes de Zernike [m]
- S_V: vecteur contenant les positions de centroides mesurés [m]
- Z: matrice qui contient les amplitudes RMS des modes de Zernike [m]
- S: matrice qui contient les positions des centroides [m]
- D^+: matrice de reconstruction
- t: facteur de transmission [-]
- SEP: aberration [dpt] ou [m^{-1}]
- r: rayon de la pupille d'entrée du système [mm]
- ρ': rayon de la tache d'Airy
- d_1: écart entre l'objet et le foyer objet
- d_2: écart entre l'image et le foyer image
- MPR: éclairement maximal au niveau de la cornée
- P: puissance du laser [W]
- NA: ouverture numérique de la fibre optique
- n': indice de réfraction de l'air
- a: demi angle d'ouverture du faisceau
- t: facteur de transmission
- D_X: indice de densité optique
- SEP: aberration exprimée en dioptries
- r: rayon de la pupille [mm]

ANNEXE 3 - MODE D'EMPLOI DES FONCTIONS MATLAB

Avant toute chose, les fonctions suivantes n'ont été testées qu'avec la version 7.0.0.19920 (R14) de MATLAB sur un PC équipé de Microsoft Windows XP, SP1.

Les fonctions ont été prévues pour pouvoir s'adapter à différents types de trames de microlentilles et différentes caméras.

Les étapes à effectuer avant de pouvoir utiliser le senseur de fronts d'ondes pour mesurer les aberrations de l'œil sont les suivantes.

1. DETERMINATION DES MEILLEURS PARAMETRES DE SIMULATION

Des paramètres de simulation bien choisis permettent de minimiser les erreurs propres au senseur et ainsi augmenter la précision et/ou diminuer les temps de calcul.

La fonction prévue à cet effet est:

`optimise_gf_sample_sub.m`

Cette fonction nécessite de connaître les caractéristiques de la trame de microlentilles, la taille des pixels de la caméra et la longueur d'onde utilisée.

Il s'agit ensuite de fixer une plage pour le facteur de garde et le nombre d'échantillons par microlentille.

Le programme calcule toutes les combinaisons possibles et ne retourne que les couples de valeurs qui correspondent aux filtres fixés par l'utilisateur.

Mémorisez ensuite le nombre d'échantillons par sous pupille qui répond aux exigences et notez la valeur du facteur de garde de départ (attention ce n'est pas celui qui a été déterminé par le programme !). Ces deux paramètres seront à réintroduire dans l'étape suivante.

2. DETERMINATION DE LA MATRICE DE RECONSTRUCTION D^+

Cette fonction est très importante car c'est elle qui créé la matrice de reconstruction D^+. Cette fonction requiert les mêmes paramètres que la fonction précédente, avec en plus le facteur de garde et le nombre d'échantillons par microlentille déterminés précédemment. Des paramètres supplémentaires sont nécessaires tels que le nombre de bits de la caméra et un facteur d'échelle. Ce dernier doit être choisi pour s'assurer que le senseur de fronts d'ondes reste en régime linéaire pour tous les modes simulés. En général, plus le nombre de modes à identifier est élevé, plus ce facteur doit être petit. Par exemple, pour notre application, ce facteur d'échelle est de 10^{-7}. Cela signifie que l'amplitude RMS des modes simulés est $1 \cdot 10^{-7}$ m.

Le nom de la fonction utilisée à cet effet est:

`Determination_reconstructeur_D_v2_4.m`

Les résultats ainsi que les paramètres de simulation sont sauvegardés à la fin dans un fichier au format '.mat' qu'il convient de renommer en conséquence. Le nom par défaut de ce fichier est :

`Parametres_030.mat`

Une copie de la matrice de reconstruction D^+ est sauvegardée dans le fichier :

`D.mat`

3. CARACTERISATION DES ERREURS DU RECONSTRUCTEUR

La fonction suivante permet de quantifier les erreurs de reconstruction, donc la précision, qu'il est possible d'atteindre avec cet analyseur de fronts d'ondes, dans des conditions d'utilisation idéales.

`Caracterisation_reconstructeur_D_v2_4.m`

Cette fonction reprend les paramètres sauvegardés précédemment dans le fichier :

`Parametres_xxx.mat`

Les modes et les amplitudes à tester doivent être introduites dans cette fonction. Les résultats se présentent sous la forme d'une matrice qui contient le mode, l'amplitude du front incident et l'erreur RMS du front d'onde reconstruit.

Ces résultats peuvent être observés sous forme graphique à l'aide de la fonction :

`erreur_relative_RMS.m`

Cette dernière est très rudimentaire et doit être modifiée par l'utilisateur en fonction de la caractérisation effectuée.

4. DECOMPOSITION MODALE D'UN FRONT D'ONDE A PARTIR D'UNE IMAGE OU VIDEO, SIMULEE OU REELLE

Une interface graphique a été prévue à cet effet pour faciliter l'acquisition et le traitement des données.

Le nom de cette interface est:

`Wavefront_sensor.fig`

MODES DE FONCTIONNEMENT (GENERAL MODE)

Le mode Caméra

La décomposition modale du front est effectuée à partir des images fournies par la caméra. Les seuls modèles de caméras supportées sont Lumenera 070C et 070M.

Le mode Fichier

La décomposition modale du front est effectuée à partir d'un fichier qui contient une image.

FILE

Load video (or image)…

L'extension de ce fichier doit être '.mat' et doit contenir les variables suivantes:

CCD_video	c'est la matrice qui contient les images
exposition	le temps d'exposition de chaque image
gain	c'est le gain de la caméra

Le programme peut également traiter des vidéos, image après image, en indiquant l'image de début et l'image de fin dans les cellules correspondantes. Le nombre d'images contenues dans ce fichier est également indiqué.

CAMERA

Camera on / Camera off

Ouverture / Fermeture de la communication avec la caméra

Mode 12/8 bits

Définit le nombre de bits utilisés lors de la quantification

Exposition

Durée durant laquelle la cellule CCD collecte les photons.

Gain

C'est le gain analogique de la caméra. (permet d'augmenter la sensibilité de la caméra, mais également le bruit)

Nombre d'images

C'est le nombre d'images dont la caméra va faire l'acquisition lors de chaque boucle. Durant ce temps, aucune autre tâche n'est effectuée pour permettre d'accélérer le processus. Les données devront être traitées par la suite si ce nombre est supérieur à 1.

MESURES

Mesure continue

La mesure continue procède à un traitement en boucle infinie des images.

En mode caméra, le programme procède à l'acquisition du nombre fixé des images, puis effectue le traitement sur la dernière image. Si cette option est activée, lors de la prochaine acquisition, les images précédentes de la caméra seront perdues.

Save…

Les mesures peuvent être sauvegardées uniquement au format '.mat'. Ceci sauvegarde les images comprises entre 'Première image' et 'Dernière image'. En mode caméra, toutes les images, le temps d'exposition et le gain de la caméra, la décomposition modale moyenne et celle de référence, ainsi que la position de la trame, sont sauvegardées.

Load…

Permet de visualiser la décomposition modale d'une mesure précédemment sauvegardée

Load Reference…

Il est possible de charger des aberrations qui seront soustraites aux mesures. Cette fonction est utilisée pour soustraire les aberrations propres du système aux mesures. Une mesure des aberrations du système doit avoir été sauvegardée auparavant.

Sans reference

Cette option permet de ne pas utiliser la référence chargée à l'aide de 'Load Reference…'durant la mesure.

Status:

Il indique l'état du programme.

Running…	si le programme est en fonction
Idle	si le programme ne fait rien de spécial

POSITIONNEMENT DE LA TRAME

Positionnement automatique

Le positionnement automatique de la trame de microlentilles permet d'annuler les aberrations type tip et tilt.

Un régulateur proportionnel de gain Kp est utilisé pour cette opération. La régulation n'étant pas parfaite, il est parfois nécessaire d'entrer manuellement les positions de la trame. La régulation ne se fait qu'en mode mesure continue

Positionnement manuel

La position de la trame doit être déterminée à l'aide des cellules 'Centre ligne' et 'Centre colonne'.

Un seuillage peut être effectué sur l'image. Le niveau moyen du bruit est à introduire dans la cellule 'Niveau du bruit'

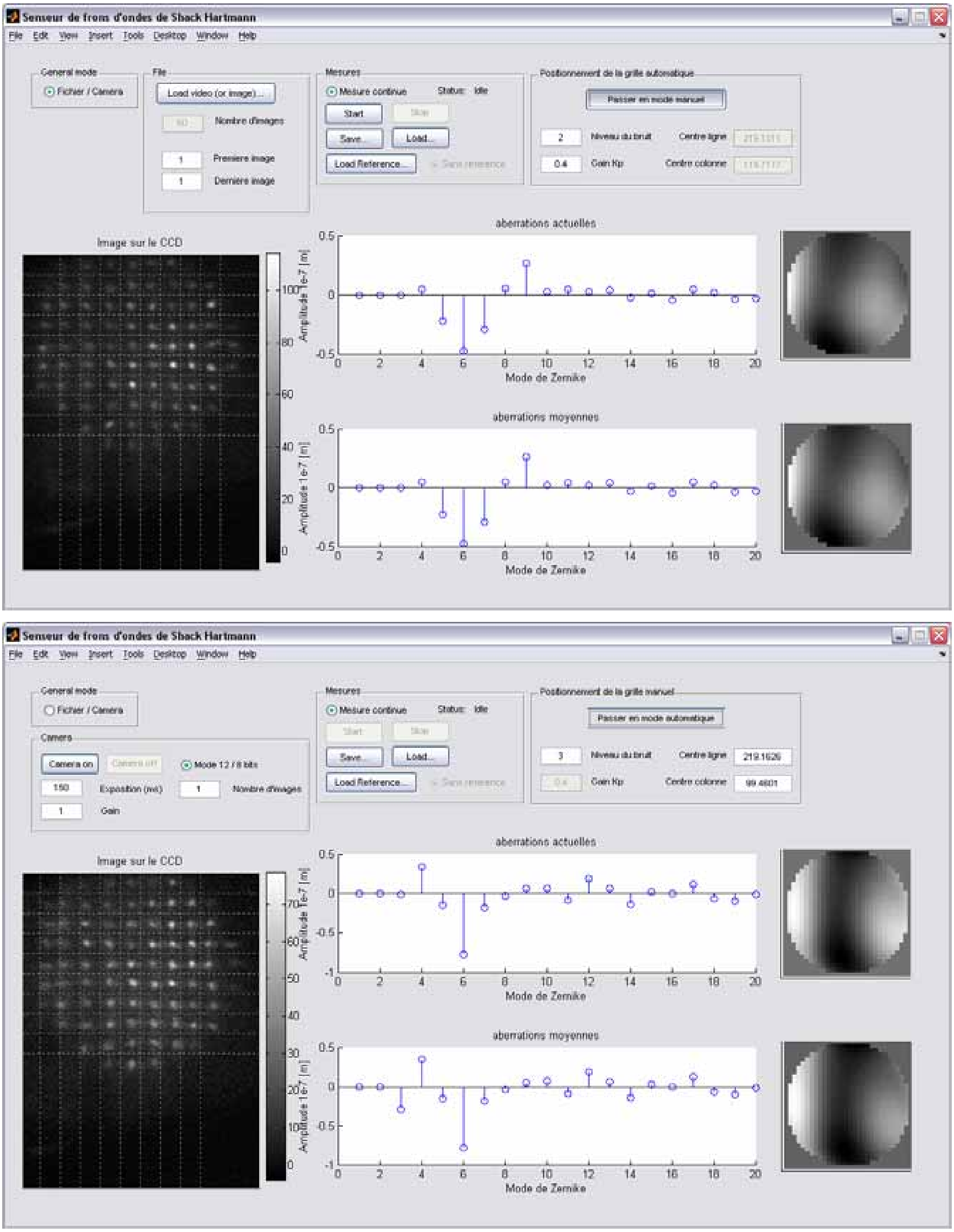


Figure 33 – Interface graphique du programme de décomposition modale

REMERCIEMENTS

M. Sebastien Tanniger, EIVD, pour sa contribution à l’aboutissement de ce projet, notamment pour le développement de l’interface de la caméra.

M. Martial Geiser, Institut de Recherche en Ophtalmologie, pour les nombreux conseils et informations apportés concernant l’œil et ses caractéristiques.

M. Philippe Horisberger, Optic Oron, pour la mise à disposition des lentilles ophtalmiques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.R. Feinup, Phase retrieval algorithms: a comparison, *Applied Optics* 21(15) : 2758-2769, 1982.

[2] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, with S. Hamid Nawab, *Signals & Systems* 2nd ed., Prentice Hall of India, 2003.

[3] Jason Porter. Aberrations of the human eye: Structure. *The institute of Optics and center for Visual Science, University of Rochester*

[4] Eugene Hecht, Hecht Optics 2nd edition, Chapter 11-Introduction to Fourier Optics, 1987

[5] Sébastien Tanniger, Utilisation d'un senseur de courbure pour la mesure des aberrations de l'œil, *EIVD-Yverdon*, 2003.

[6] Heidi Hofer, Pablo Artal, Ben Singer, Juan Luis Aragon, David R. Williams, Dynamics of the eye's wave aberration, *J.Opt. Soc. Am.* 18(3) : 497-506, 2001.

[7] Junzhong Liang, David R. Williams, ans Donald T. Miller, Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics, *J.Opt. Soc. Am.* 14(11) : 2884-2892, 1997.

[8] Luis Alberto Carvalho, A simple and effective algorithm for detection of arbitrary Hartmann –Shack patterns, *J.jbi,* 2003.

[9] Larry N. Thibos Ph.D., F.A.A.O, Ming Ye Ph.D., Xiaoxiao Zhang Ph.D., and Arthur Bradley Ph.D., Spherical Aberration of the Reduced Schematic Eye with Elliptical Refracting Surface, *School of Optometry, Indiana University, Bloomington, IN*

[10] R.Bornand, cours d'optique à l'usage des Ingénieurs en microtechnique, *EIVD-Yverdon*, édition 2002.

[11] Edmund optics Ltd, Technical support, Integration of Optical Systems.

[12] Prof. Dr.-Ing. Dickmann, EXP20 LASER SAFETY, Fachhochschule Münster Fachbereich Physikal. Technik.

[13] Abdul Awwal, Brian Baumann, Don Gavel, Scot Olivier, Steve Jones, Dennis Silva, Joseph L. Hardy, Thomas Barnes and John S. Werner, Characterisation and Operation of a Liquid Crystal Adaptative Optics Phoropter, *Proc. of SPIE* vol. 5169.

[14] Martial Geiser, Institut de Recherche en Ophtalmologie, *CH-Sion*.

[15] Jesper Hjortdal Kristian Naeser. Regular astigmatism and total refractive power. Department of ophthalmology, Randers, Centralsygehus, Denmark, 2003.